

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Neven Šego

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Neven Šego

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr.sc. Damiru Markučiću na savjetima, pomoći i strpljenju.

Neven Šego



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Neven Šego**

Mat. br.: 0035167875

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA VRTLOŽNIM STRUJAMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ROUND-ROBIN TEST FOR EDDY CURRENT INSPECTION**

Opis zadatka:

Ispitivanje vrtložnim strujama (EC) jedna je od metoda nerazornih ispitivanja koja se primjenjuje u redovitim pregledima komponenti zrakoplovnih konstrukcija. U svrhu stjecanja uvida u sposobnost EC ispitnih sustava, odnosno u pouzdanost rezultata ispitivanja vrtložnim strujama, potrebno je provesti nizove usporedbenih ispitivanja i mjerenja za različite konfiguracije ispitnih sustava i/ili postavki imajući u vidu sljedeće smjernice:

- o vrsta korištenih sondi, kao što su npr. apsolutna i diferencijalna;
- o usmjerenost sondi / izvedba jezgre zavojnice;
- o ispitna frekvencija;
- o vrsta ispitnog materijala;
- o debljina ispitnog uzorka;
- o orijentacija nepravilnosti u ispitnom uzorku.

Usporedbena ispitivanja i mjerenja provesti na odabranim referentnim uzorcima s prirodnim ili umjetno izrađenim nepravilnostima. Prikazati i komentirati dobivene rezultate.

U radu treba navesti upotrijebljenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

- 1. rok: 15. veljače 2013.
- 2. rok: 11. srpnja 2013.
- 3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
- 2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
- 3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. O metodi nerazornih ispitivanja vrtložnim strujama	1
1.1.1. Princip rada	1
1.1.2. Prednosti metode.....	3
1.1.3. Ograničenja metode.....	3
1.1.4. Vrste sonde	4
2. Primjena ispitivanja vrtložnim strujama.....	6
2.1. Mjerenje debljine.....	6
2.1.1. Mjerenje debljine električki nevodljivog premaza.....	6
2.1.2. Mjerenje debljine električki vodljivog premaza tanke ploče od električki vodljivog materijala.....	7
2.2. Mjerenje električne vodljivosti.....	10
3. Neke od nepravilnosti na kojima se primjenjuju EC ispitivanja.....	12
4. Sposobnost ispitnog sustava i pouzdanost rezultata.....	14
4.1. Sposobnost ispitnog sustava.....	14
4.2. Faktori koji utječu na pouzdanost rezultata.....	16
5. Analiza rezultata usporedbenih ispitivanja vrtložnim strujama.....	19
6. Zaključak.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1: Princip rada EC uređaja [4].....	2
Slika 2: Sposobnost sustava da otkrije nepravilnost ovisno o njenoj orijentaciji - a) nepravilnost je usmjerena kao i strujnice, b) nepravilnost je usmjerena okomito na smjer strujnica [2].....	2
Slika 3: Utjecaj ruba uzorka na odziv sustava - a) strujnice ne dodiruju rub, b) strujnice se izobličuju pod utjecajem ruba [2].....	3
Slika 4: Dijagram impedancije zavojnice u referentnoj točki [5].....	6
Slika 5: Dijagram impedancije zavojnice za nevodljivi premaz [5].....	7
Slika 6: Standardna dubina prodiranja [5].....	8
Slika 7: Mjerljiva debljina uzorka u odnosu na standardnu dubinu prodiranja [5].....	9
Slika 8: Krivulje izmjerene debljine u ovisnosti o impedanciji zavojnice za različite metale [5].....	10
Slika 9: Utjecaj frekvencije struje na krivulju impedancije [5].....	11
Slika 10: Dubina prodiranja za dva karakteristična slučaja - visoka ispitna frekvencija, dobra električna vodljivost i velika permeabilnost (lijevo) te niska ispitna frekvencija, loša električna vodljivost i mala permeabilnost (desno) [7].....	15
Slika 11: Westinghouse Owners Group uzorci [5].....	19
Slika 12: Uzorak za španjolsku nuklearnu elektranu [5].....	20
Slika 13: Zetec MIZ-27SI uređaj.....	20
Slika 14: Sažetak ključnih rezultata ispitivanja za odabrane uzorke; omjer signal/šum je naveden nakon provedenog demagnetiziranja [6].....	22
Slika 15: Promjena amplitude signala za uzorak APE-1 [6].....	23
Slika 16: Fazni pomak za uzorak APE-1 [6].....	24
Slika 17: Linijski prikaz za uzorak APE-1 [6].....	24
Slika 18: Promjena amplitude signala za uzorak APE-4 [6].....	25
Slika 19: Fazni pomak za uzorak APE-4 [6].....	26
Slika 20: Linijski prikaz za uzorak APE-4 [6].....	26
Slika 21: Promjena amplitude signala za uzorak INE-A-4 [6].....	27
Slika 22: Fazni pomak za uzorak INE-A-4 [6].....	28
Slika 23: Linijski prikaz za uzorak INE-A-4 [6].....	28
Slika 24: Promjena amplitude signala za uzorak MPE-6 [6].....	29
Slika 25: Fazni pomak za uzorak MPE-6 [6].....	30
Slika 26: Linijski prikaz za uzorak MPE-6 [6].....	30
Slika 27: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-3-5 [6].....	31
Slika 28: Fazni pomak za uzorak ONP-3-5 [6].....	32
Slika 29: Linijski prikaz za uzorak ONP-3-5 [6].....	32
Slika 30: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-3-8 [6].....	33
Slika 31: Fazni pomak za uzorak ONP-3-8 [6].....	34
Slika 32: Linijski prikaz za uzorak ONP-3-8 [6].....	34
Slika 33: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-D-2 [6].....	35
Slika 34: Fazni pomak za uzorak ONP-D-2 [6].....	36
Slika 35: Linijski prikaz za uzorak ONP-D-2 [6].....	36
Slika 36: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-D-5 [6].....	37
Slika 37: Fazni pomak za uzorak ONP-D-5 [6].....	38
Slika 38: Linijski prikaz za uzorak ONP-D-5 [6].....	38

Slika 39: Promjena amplitude signala za uzorak OPE-2 [6].....	39
Slika 40: Fazni pomak za uzorak OPE-2 [6].....	40
Slika 41: Linijski prikaz za uzorak OPE-2 [6].....	41
Slika 42: Promjena amplitude signala za uzorak OPE-5 [6].....	42
Slika 43: Linijski prikaz za uzorak OPE-5 [6].....	43
Slika 44: Fazni pomak za uzorak OPE-5 [6].....	43
Slika 45: Promjena amplitude signala za uzorak POP-8 [6].....	44
Slika 46: Fazni pomak za uzorak POP-8 [6].....	45
Slika 47: Linijski prikaz za uzorak POP-8 [6].....	45
Slika 48: Promjena amplitude signala za uzorak B501 [6].....	46
Slika 49: Fazni pomak za uzorak B501 [6].....	47
Slika 50: Promjena amplitude signala za uzorak B515 [6].....	48
Slika 51: Fazni pomak za uzorak B515 [6].....	49

POPIS TABLICA

Tablica 1: Prosječne vrijednosti standardne dubine prodiranja za različite materijale u inčima [2].....	8
Tablica 2: Šifra, opis i primjer moguće lokacije nekih od nepravilnosti koje prolaze kroz cijelu debljinu uzorka [5].....	12
Tablica 3: Šifra, opis i primjer moguće lokacije nekih od površinskih nepravilnosti [5].....	13
Tablica 4: Faktori koji utječu na pouzdanost rezultata pojedine metode [5].....	17
Tablica 5: Kvalitativni prikaz pojedinih utjecaja na rezultate EC mjerenja za ručno i automatizirano ispitivanje [5].....	18
Tablica 6: Sažetak ključnih stvarnih podataka za sve uzorke [6].....	21
Tablica 7: Rezultati ispitivanja na uzorcima bez oštećenja [6].....	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Z	ohm (Ω)	impedancija zavojnice
R	ohm (Ω)	otpor materijala/omski otpor zavojnice
X_L	ohm (Ω)	induktivni otpor zavojnice
L	henri (H)	induktivitet zavojnice
f	hertz (Hz)	frekvencija struje
G	siemens (S)	električna vodljivost
μ	voltsekunda po ampermetru (Vs/Am)	permeabilnost
μ_r		relativna permeabilnost materijala
H	amper po metru (A/m)	jakost magnetnog polja
B	tesla (T)	magnetna indukcija
I	amper (A)	jakost električne struje
r	metar (m)	udaljenost od središta vodiča
δ	metar (m)	dubina prodiranja

SAŽETAK

Tokom redovitog održavanja zrakoplovnih dijelova vrlo je važno moći ispitati stanje dijela bez da ga se oštećuje. Jedna od metoda nerazornih ispitivanja (NDT) je i metoda vrtložnih struja (EC), koju obrađujemo u ovom radu. Analizirati ćemo rezultate usporedbenih ispitivanja objavljenih u literaturi kako bismo dobili uvid u sposobnosti EC ispitnih sustava i pouzdanosti rezultata uz naglasak na vrstu sonde, ispitnu frekvenciju te vrstu materijala.

Ključne riječi: nerazorna ispitivanja (NDT), sposobnost sustava, pouzdanost rezultata

SUMMARY

During aircraft component maintenance the ability to test a part without damaging it is very important. One of the methods for nondestructive testing (NDT) is eddy current method, which will be discussed in this document. The analysis of the test results found in available literature will be given in order to be able to understand the capability of the EC measuring system and result reliability better, with the emphasis on the type of probe used, current frequency and component material type.

Key words: nondestructive testing (NDT), system capability, result reliability

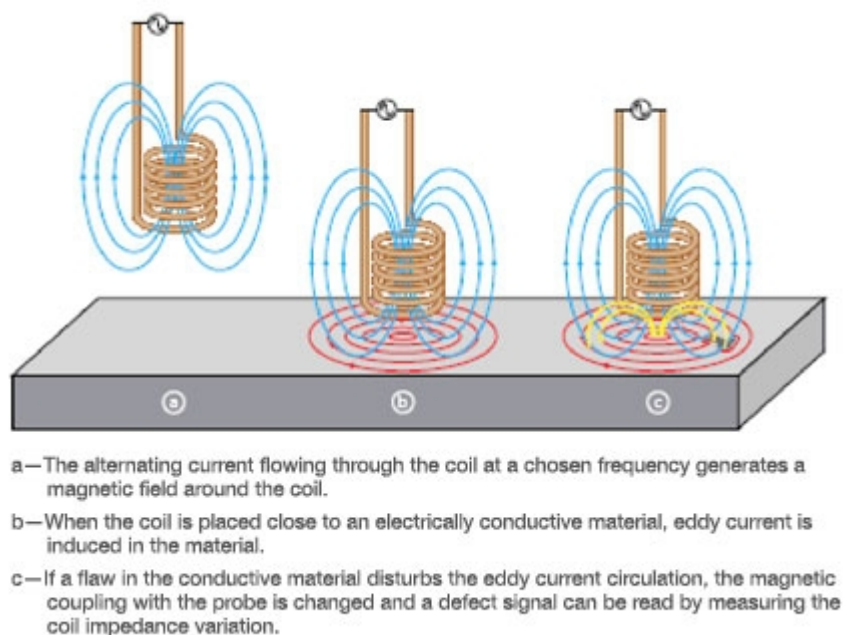
1. UVOD

1.1. O metodi nerazornih ispitivanja vrtložnim strujama

Metoda ispitivanja vrtložnim strujama (EC) se primjenjuje u zrakoplovnoj industriji tokom redovite provjere zrakoplovnih dijelova kako bi se utvrdilo postoje li u ispitnom zrakoplovnom dijelu kakve nepravilnosti nastale bilo tokom proizvodnje bilo uslijed eksploatacije te, u slučaju da je nepravilnost otkrivena, za određivanja lokacije i dimenzija nepravilnosti us svrhu utvrđivanja može li se ispitni zrakoplovni dio i dalje smatrati ispravnim, tj. da je nepravilnost dovoljno mala da sigurnost zrakoplova i putnika nije ugrožena. Primjena EC metode je ograničena na električki vodljive materijale jer je mogućnost induciranja vrtložnih struja u ispitnom uzorku nužan uvjet a zbog ograničene dubine prodiranja se primjena često ograničava na tankostijene konstrukcije. Ispitivanja EC se često provode u paru s ispitivanjima ultrazvukom (UZ) jer EC omogućava brz pregled površine a UZ dobru dubinsku prodornost [4].

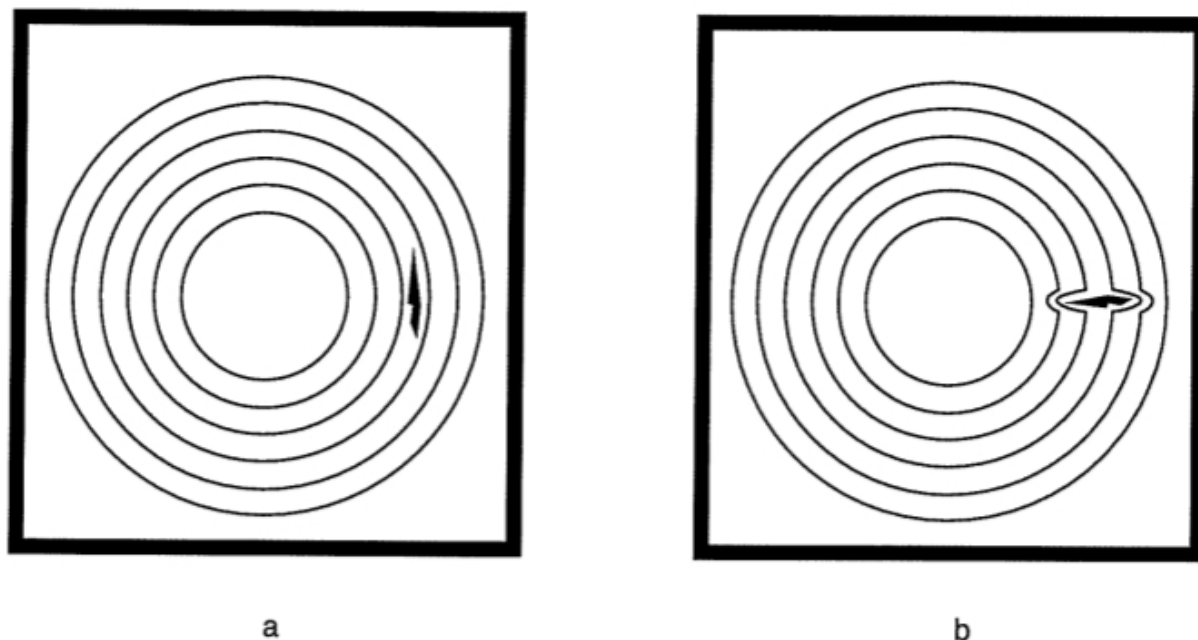
1.1.1. Princip rada

Princip rada uređaja je da zavojnica u sondi stvara izmjenično magnetno polje koje ulazi u ispitni uzorak gdje inducira vrtložne struje koje pak stvaraju vlastito magnetno polje koje utječe na zavojnicu u sondi. Kao posljedica tog utjecaja se javlja promjena impedancije Z zavojnice i fazni pomak u zavojnici. Promjene se mogu promatrati ili na uzbudnoj zavojnici ili na dodatnoj "tražilačkoj" zavojnici, ovisno o konstrukciji sonde. Ovu metodu možemo primijeniti i za mjerenje debljine i za detekciju nepravilnosti jer i jedno i drugo utječe na amplitudu i strujanje vrtložnih struja u uzorku te time utječe i na magnetno polje koje stvaraju vrtložne struje. Princip rada je prikazan na [Slika 1].



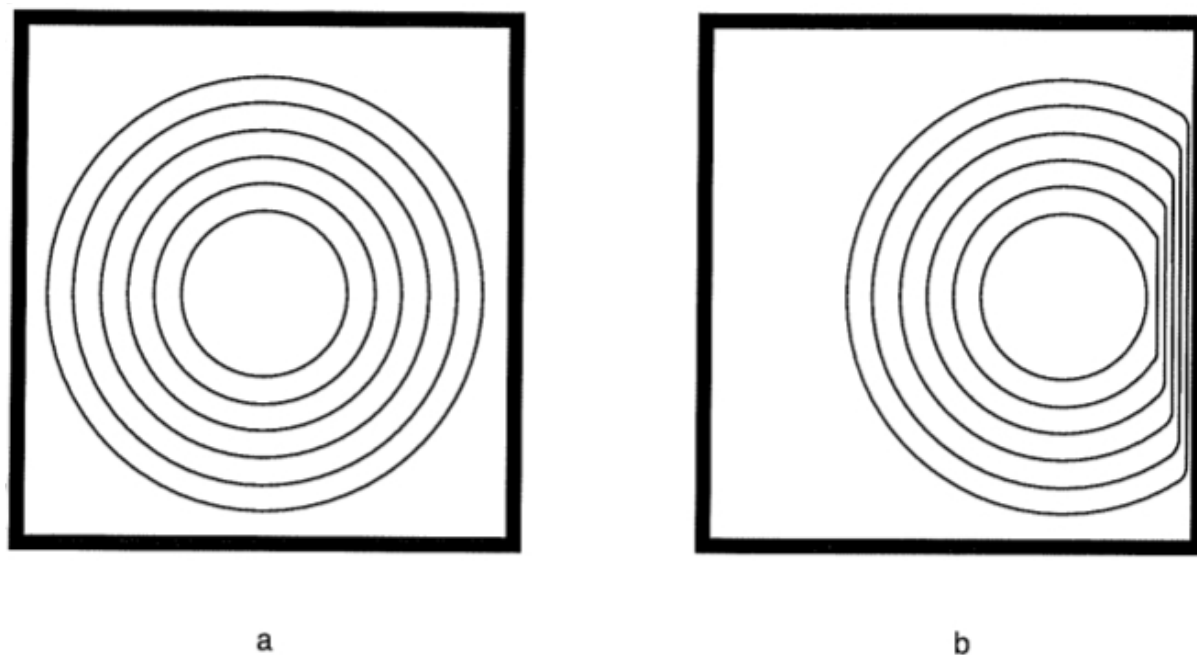
Slika 1: Princip rada EC uređaja [4]

Utjecaj orijentacije nepravilnosti na sposobnost ispitnog EC sustava da ju otkrije je kvalitativno prikazan na [Slika 50]



Slika 2: Sposobnost sustava da otkrije nepravilnost ovisno o njenoj orijentaciji - a) nepravilnost je usmjerena kao i strujnice, b) nepravilnost je usmjerena okomito na smjer strujnica [2]

Utjecaj ruba uzorka na odziv je kvalitativno prikazan na [Slika 3].



Slika 3: Utjecaj ruba uzorka na odziv sustava - a) strujnice ne dodiruju rub, b) strujnice se izobličuju pod utjecajem ruba [2]

1.1.2. Prednosti metode

Prednosti metode vrtložnih struja u odnosu na druge NDT metode su:

1. pregled površine traje kraće nego kod klasične ultrazvučne metode
2. za razliku od ultrazvučne metode, nije potreban kontakti fluid
3. površina uzorka ne zahtjeva posebnu pripremu te je metoda puno manje osjetljiva na premaze i nečistoće na površini u odnosu na ultrazvučnu metodu
4. detektira vrlo male pukotine na površini i blizu površine
5. moguće je ispitati uzorke složene geometrije
6. može se koristiti za mjerenje provodnosti električne struje te za mjerenje debljine premaza
7. mjerni uređaji su prenosni
8. metoda daje trenutni odziv
9. kontakt mjernog uređaja i uzorka nije nužan

1.1.3. Ograničenja metode

Kao i svaka metoda, EC ima određena ograničenja:

1. ograničena dubina prodiranja u ispitni uzorak
2. u svakom trenu nekoliko varijabli utječe na odziv
3. detekcija diskontinuiteta je kvalitativna a ne kvantitativna
4. ispitni uzorak mora biti od električki vodljivog materijala
5. zbog utjecaja većeg broja varijabli na odziv, potrebno je iskustvo pri radu
6. rubovi ispitnog uzorka i promjene geometrije mogu biti detektirane kao nepravilnosti

1.1.4. Vrste sondi

Većina sondi je rađena za detekciju površinskih pukotina. Sonde mogu biti ravne ili kose, oklopljene ili neoklopljene te mogu imati savitljivo kućište koje omogućava prilagodbu oblika.

Prema načinu rada sonde se dijele na [1]:

1. **Apsolutne** - imaju jednu zavojnicu koja služi i za uzбудu i za detekciju
2. **Diferencijske** - imaju dvije zavojnice, od kojih je jedna uzbudna i referentna, a druga "tražeća" i na njoj se mjere promjene u odnosu na uzbudnu

S obzirom na geometriju, sonde mogu biti [7]:

1. **Površinske sonde** - služe za ispitivanje površina te ih ima različitih veličina
2. **Bobin sonde** - slične su površinskim sondama ali imaju ispupčenje kako bi mogle ispitivati uzorke sa šupljinama (cijevi, provrti...). Mogu biti ručno podesive (podešavanje dubine i rotiranje sonde se obavlja ručno) ili automatizirane i u paru sa skenerom. Automatizirane u pravilu imaju veću osjetljivost na nepravilnosti i daju bolje rezultate.
3. **Prstenaste sonde** - obuhvaćaju uzorak, tj. uzorak se umeće u sondu. Velika prednost ovih sondi je njihova mogućnost brzog pregleda velike površine uzorka ali zbog toga imaju manju osjetljivost na nepravilnosti u odnosu na površinske sonde.
4. **Sonde velikog promjera** - dugi niz godina su za pregled šupljina velikog promjera bile korištene bobin sonde pa se u zadnje vrijeme za te potrebe razvijaju sonde velikog promjera jer pregled bobin sondama traje jako dugo i često se dogodi da zbog velike debljine materijala bobin sonda ne može detektirati nepravilnosti duboko u materijalu.

S obzirom na konstrukciju jezgre, sonde dijelimo na [7]:

1. **Sonde s punom jezgrom** - jezgra je izrađena od feritnog materijala koji koncentrira magnetne silnice čime se postiže veća osjetljivost sonde na nepravilnosti te manja osjetljivost na zračnost između sonde i ispitnog uzorka ali i smanjena površina koju sonda provjerava u jednom prolazu.
2. **Sonde sa šupljom jezgrom** - u ovom slučaju jezgra može biti ili prazna (tj. sadrži samo zrak) ili od neferitnog materijala. Ovakve sonde imaju manju osjetljivost na nepravilnosti i veću osjetljivost na zračnost između sonde i ispitnog uzorka ali i veće područje koje pregledavaju u jednom prolazu nego sonde s punom jezgrom.

2. Primjena ispitivanja vrtložnim strujama

2.1. Mjerenje debljine

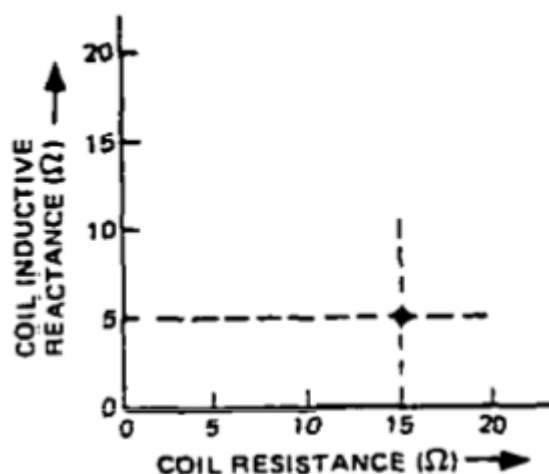
EC metoda omogućava više vrsta mjerenja debljine a to su

1. mjerenje debljine električki nevodljivog premaza na električki vodljivoj podlozi
2. mjerenje debljine električki vodljivog premaza na električki nevodljivoj podlozi
3. mjerenje debljine tanke ploče od električki vodljivog materijala

2.1.1. Mjerenje debljine električki nevodljivog premaza

Ovaj tip mjerenja se bazira na činjenici da s porastom debljine nevodljivog premaza raste udaljenost sonde od vodljivog materijala, što direktno utječe na gustoću i jakost vrtložnih struja u vodljivom materijalu a time i na impedanciju zavojnice.

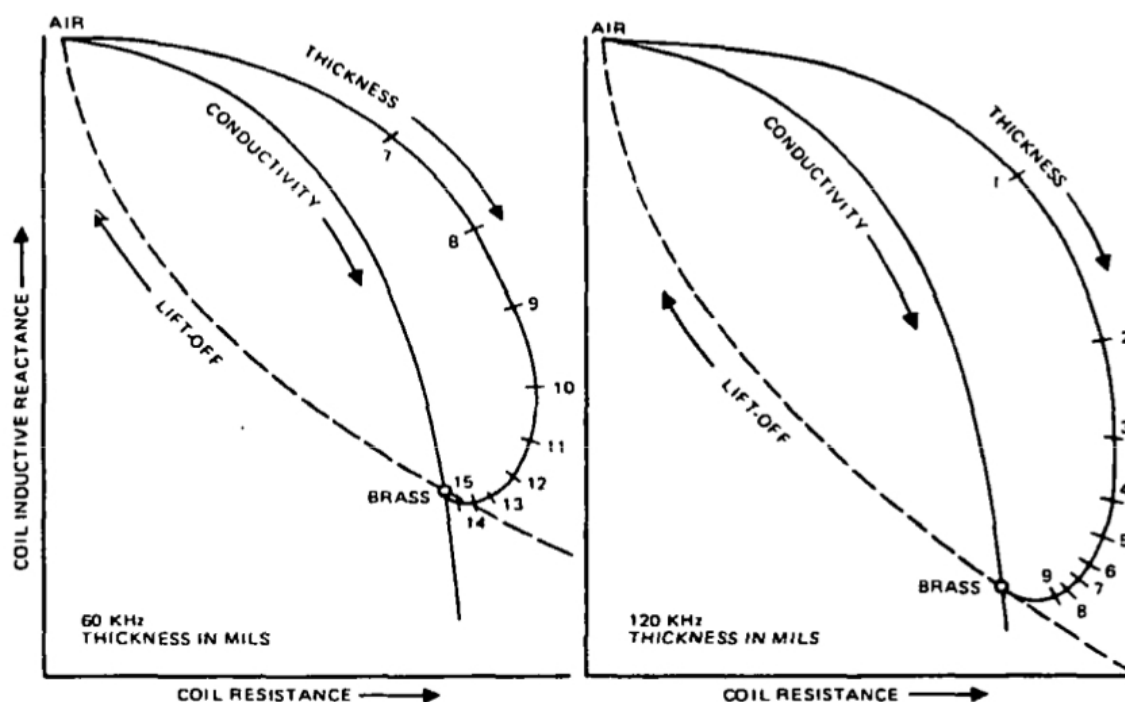
Prije ispitivanja se mjerna oprema kalibrira pomoću uzorka poznate debljine te se određuje referentna točka te ju se prikazuje u dijagramu impedancije [Slika 4]. Pri kalibraciji treba obratiti posebnu pozornost na dodatne varijable koje bi mogle utjecati na odziv (širina ispitnog uzorka, toplinska obrada, hrapavost površine...).



Slika 4: Dijagram impedancije zavojnice u referentnoj točki [5]

Za slučaj da je ispitivač siguran da je materijal premaza neferitan i električki nevodljiv, kod referentnog uzorka je bitno samo da je poznata debljina. Ako ispitivač nije siguran u svojstva premaza, primjenjuju se posebni standardi ovisno o materijalu premaza. Tokom ispitivanja se

mjeri odstupanje iznosa impedancije od početne (referentne) vrijednosti te ih se ucrtava u dijagram impedancije iz kojega se očitava debljina premaza [Slika 5].

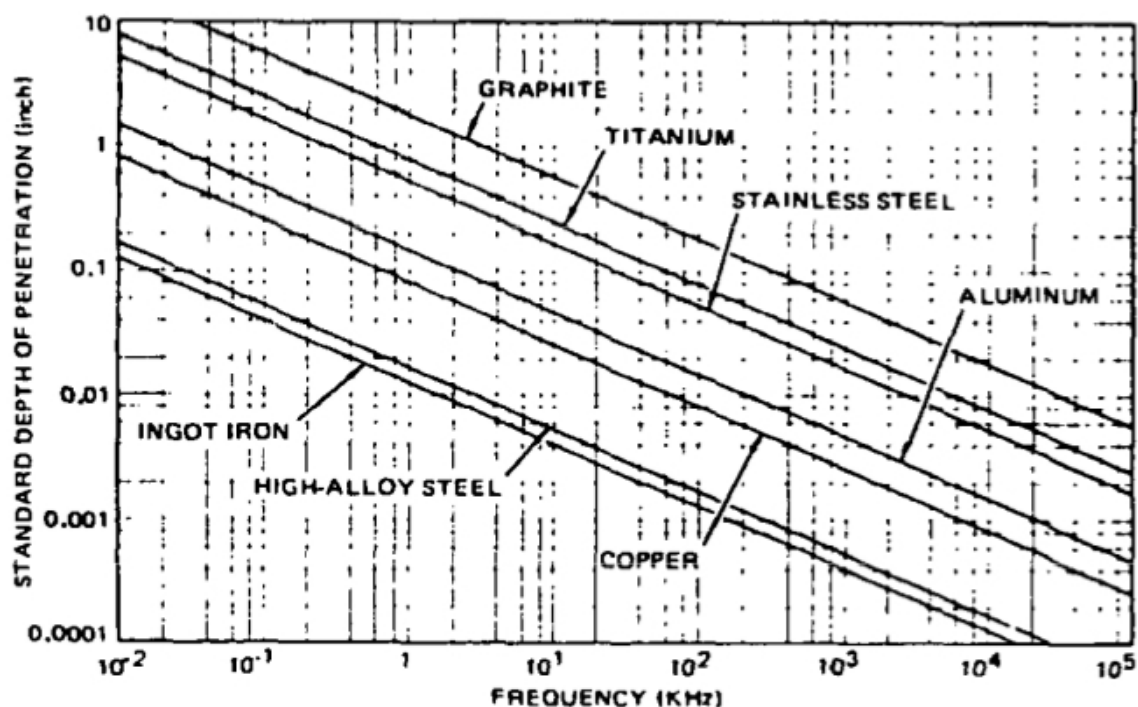


Slika 5: Dijagram impedancije zavojnice za nevodljivi premaz [5]

Kao što je već navedeno, na odziv utječe više varijabli pa je nužno osigurati da su uzorak korišten kod kalibriranja i ispitni uzorak istih svojstava (jednaka širina, jednaka toplinska obrada, jednaka hrapavost površine...).

2.1.2. Mjerenje debljine električki vodljivog premaza tanke ploče od električki vodljivog materijala

Kod mjerenja debljine vodljivog premaza ili tanke vodljive ploče se javlja dodatni uvjet u odnosu na mjerenje debljine nevodljivog premaza. Naime, nužni uvjet je da je dubina prodiranja (ovaj parametar je objašnjen u poglavlju 4.1) veća nego debljina mjerenog sloja. Iz tog razloga se uvodi pojam **standardne dubine prodiranja** a koja predstavlja dubinu u materijalu na kojoj je gustoća vrtložnih struja jednaka 37% gustoće vrtložnih struja na površini materijala. Standardna dubina penetracije varira ovisno o vrsti materijala i frekvenciji struje, kao što je vidljivo na [Slika 6] i u [Tablica 1].

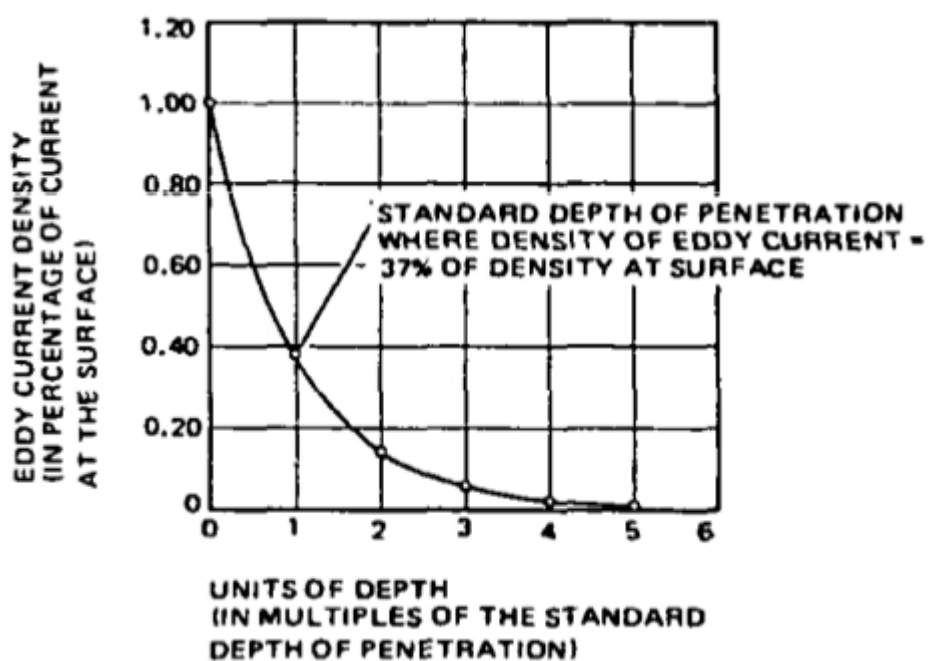


Slika 6: Standardna dubina prodiranja [5]

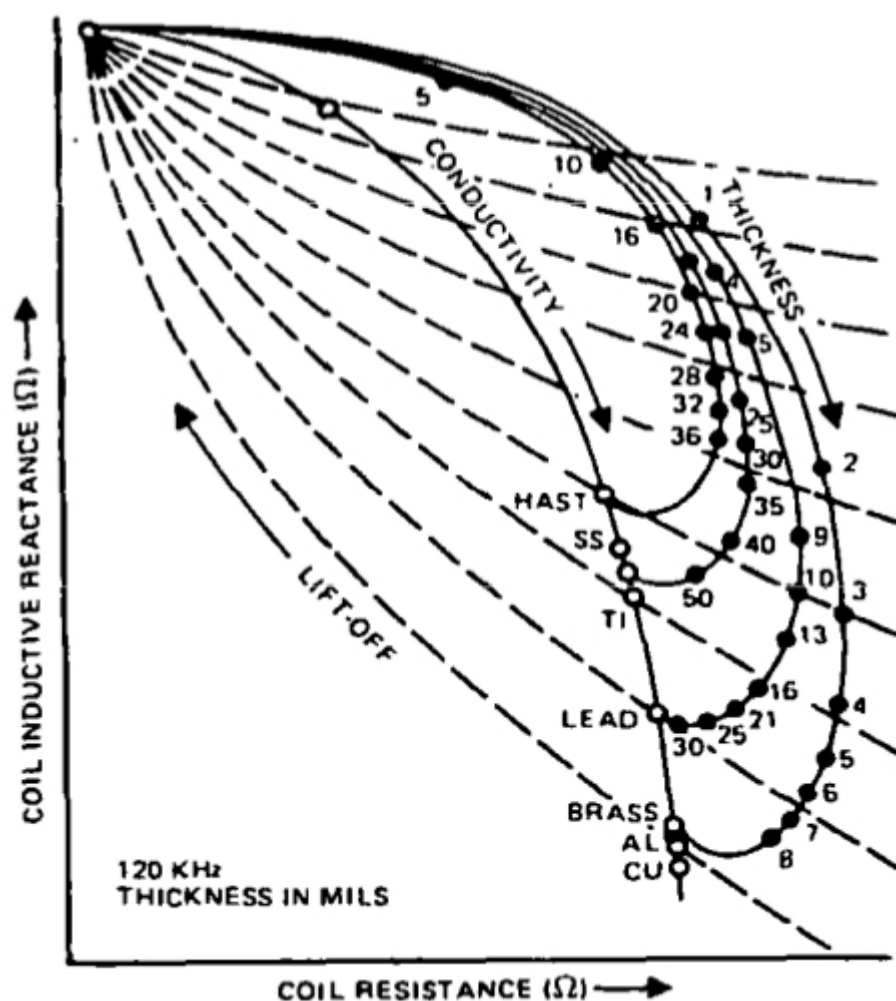
Metal	Conductivity		Permeability	36.8% Depth of penetration					
	% IACS	Resistivity		1 KHz	4 KHz	16 KHz	64 KHz	256 KHz	1 MHz
Copper	100	1.7	1	0.082	0.041	0.021	0.010	0.005	0.0026
6061 T-6	42	4.1	1	0.126	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004
7075 T-6	32	5.3	1	0.144	0.072	0.036	0.018	0.009	0.0046
Magnesium	37	4.6	1	0.134	0.067	0.034	0.017	0.008	0.0042
Lead	7.8	22	1	0.292	0.146	0.073	0.37	0.018	0.0092
Uranium	6.0	29	1	0.334	0.167	0.084	0.042	0.021	0.0106
Zirconium	3.4	70	1.02	0.516	0.258	0.129	0.065	0.032	0.0164
Steel	2.9	60	750	0.019	0.0095	0.0048	0.0024	0.0012	0.0006
Cast steel	10.7	16	175	0.018	0.0089	0.0044	0.0022	0.0011	0.0006

Tablica 1: Prosječne vrijednosti standardne dubine prodiranja za različite materijale u inčima [2]

Ako je debljina uzorka manja od standardne dubine penetracije, svaka promjena debljine uzorka se očituje u promjeni impedancije zavojnice. Ovdje valja naglasiti da je nekada moguće detektirati promjene impedancije i kada je debljina ispitnog uzorka dva do tri puta veća od standardne dubine prodiranja, kao što to prikazuje [Slika 7].



Slika 7: Mjerljiva debljina uzorka u odnosu na standardnu dubinu prodiranja [5]



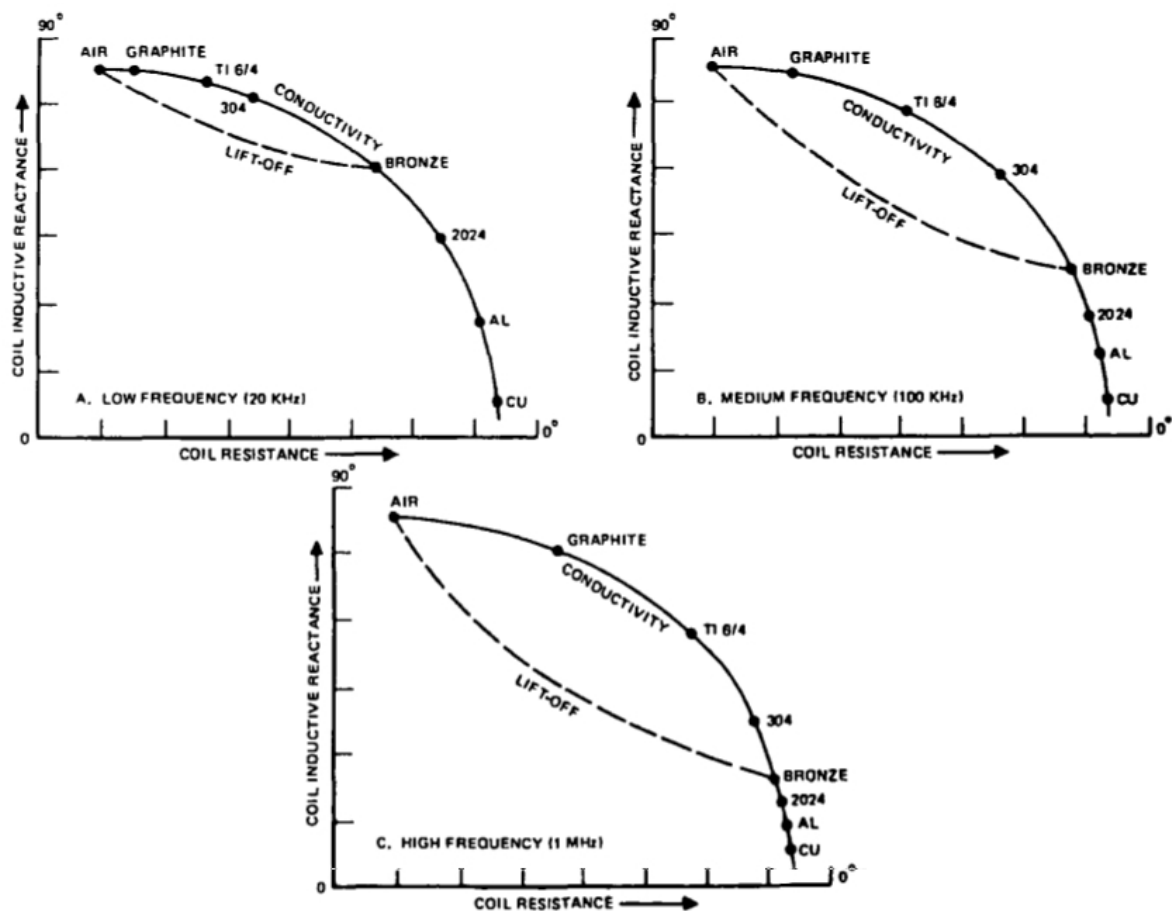
Slika 8: Krivulje izmjerene debljine u ovisnosti o impedanciji zavojnice za različite metale [5]

2.2. Mjerenje električne vodljivosti

Kao i kod mjerenja debljine, prvi korak je kalibriranje ispitne opreme s obzirom na varijable koje utječu na odziv.

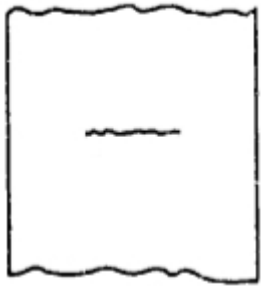

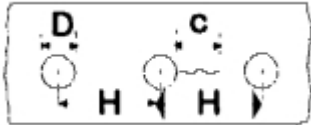
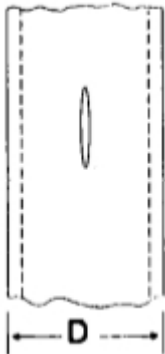
U praksi često moramo uzeti u obzir utjecaj zračnosti između sonde i površine ispitnog uzorka te ispitnu frekvenciju.

Povećanjem ispitne frekvencije dolazi do povećanja kuta između krivulje vodljivosti i krivulje zračnosti za pojedini materijal te nam to omogućava da lakše odredimo koje varijable su jače vezane uz vodljivost a koje uz zračnost. Na žalost, ovo svojstvo ima i svoj nedostatak. Naime, povećanjem frekvencije ujedno smanjujemo dubinu penetracije, što znači da ispituje sve tanji sloj uz površinu uzorka.

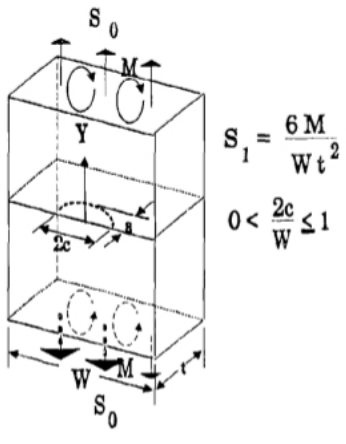
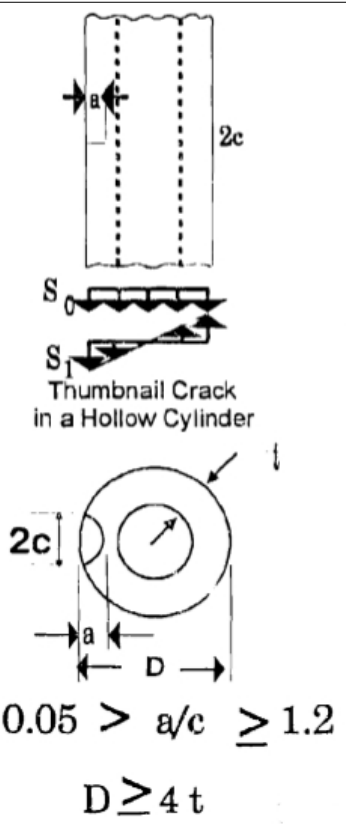


Slika 9: Utjecaj frekvencije struje na krivulju impedancije [5]

3. Neke od nepravilnosti na kojima se primjenjuju EC ispitivanja

Šifra	Opis	Primjer zrakoplovnog dijela na kojem se može naći navedena vrsta nepravilnosti	Skica
TC01	Nepravilnost kroz središte ispitne površine uzorka	Panel oplata trupa	
TC02	Nepravilnost na rubu ispitne površine uzorka	Izlazna ivica krila	
TC05	Nepravilnost na ispitnoj površini uzorka uslijed provrta na ploči s nizom provrta	Panel oplata krila s nizom zakovica	
TC07	Nepravilnost na ispitnoj površini u uzdužnom smjeru cilindra	Stijenska komora izgaranja	

Tablica 2: Šifra, opis i primjer moguće lokacije nekih od nepravilnosti koje prolaze kroz cijelu debljinu uzorka [5]

Šifra	Opis	Primjer zrakoplovnog dijela na kojem se može naći navedena vrsta nepravilnosti	Skica
SC01	Površinska nepravilnost pravokutne ploče - naprezanje i/ili savijanje	Panel oplata ktila	 $S_1 = \frac{6M}{Wt^2}$ $0 < \frac{2c}{W} \leq 1$
SC05	Male nepravilnosti na šupljem cilindru	Cijev za dovod goriva	 <p>Thumbnail Crack in a Hollow Cylinder</p> $0.05 > a/c \geq 1.2$ $D \geq 4t$

Tablica 3: Šifra, opis i primjer moguće lokacije nekih od površinskih nepravilnosti [5]

4. Sposobnost ispitnog sustava i pouzdanost rezultata

S obzirom da ne postoje dvije nepravilnosti identičnog oblika, veličine i orijentacije, nužno je poznavati sposobnost ispitnog sustava da detektira nepravilnosti. Ujedno, činjenica da smo ispitivanjem dobili neke rezultate ne znači nužno i da su ti rezultati ispravni pa je potrebno poznavati i pouzdanost rezultata.

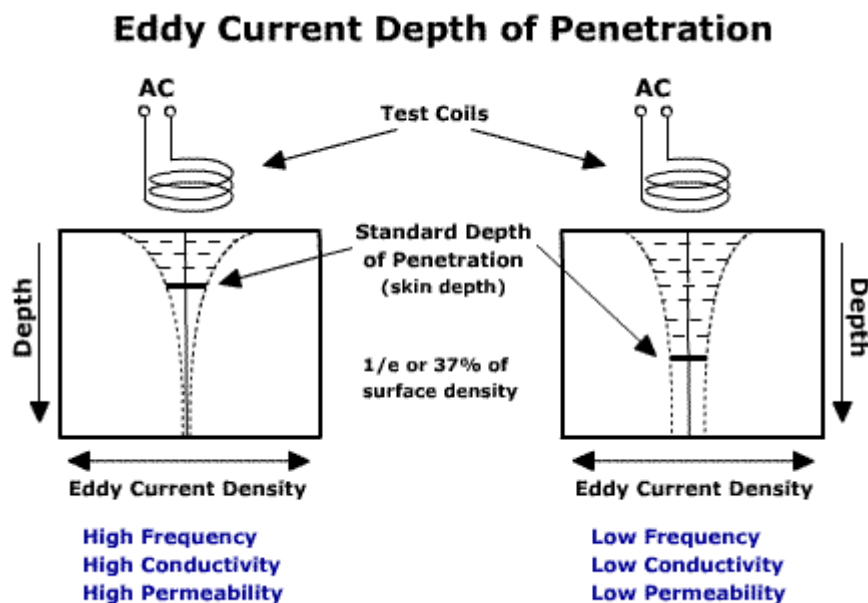
4.1. Sposobnost ispitnog sustava

Glavni parametri koji utječu na sposobnost sustava su permeabilost materijala, frekvencija struje, električna vodljivost uzorka, geometrija uzorka, stanje površine, udaljenost sonde i uzorka te omjer signal/šum.

Najvažniji podatak kod ispitivanja EC metodom je **dubina prodiranja** koja je funkcija ispitne frekvencije, permeabilnosti materijala te električne vodljivosti materijala. Dubina prodiranja nam daje podatak o tome na kojoj udaljenosti od površine ispitnog uzorka možemo otkriti nepravilnost. Prema [7] izraz koji povezuje dubinu prodiranja, ispitnu frekvenciju, električnu vodljivost i permeabilnost je

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot G \cdot \mu}} ,$$

gdje je δ dubina prodiranja, f frekvencija, G električna vodljivost a μ permeabilnost.



Slika 10: Dubina prodiranja za dva karakteristična slučaja - visoka ispitna frekvencija, dobra električna vodljivost i velika permeabilnost (lijevo) te niska ispitna frekvencija, loša električna vodljivost i mala permeabilnost (desno) [7]

Permeabilnost materijala je važna jer je svojstvo materijala te kao takva ovisi o vrsti materijala ispitnog uzorka. Za neferitne materijale i austenitni čelik je jednaka 1 a za feritne materijale i nekoliko stotina. Porastom permeabilnosti opada dubina prodiranja [1]. Permeabilnost je definirana izrazom

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r,$$

gdje je $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ permeabilnost u vakuumu a μ_r relativna permeabilnost materijala koja govori koliko puta će magnetski tok biti veći u zadanom materijalu nego u vakuumu. Permeabilnost utječe direktno na jakost magnetnog polja, kao što je vidljivo iz sljedećeg izraza:

$$H = \frac{B}{\mu},$$

gdje je B magnetska indukcija. Jakost magnetnog polja možemo izraziti i kao

$$H = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi},$$

gdje je I jakost električne struje a r udaljenost od središta vodiča.

Ispitna frekvencija utječe na dubinu prodiranja i osjetljivost te je njome lako upravljati tokom ispitivanja. Porastom frekvencije opada dubina prodiranja ali raste osjetljivost zbog veće gustoće struje na površini. Frekvencija direktno utječe na impedanciju zavojnice, što je vidljivo iz izraza

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$
$$X_L = 2 \cdot f \cdot L$$

gdje je R omski otpor zavojnice, X_L induktivni otpor zavojnice, f frekvencija struje a L induktivitet zavojnice.

Električna vodljivost utječe na dubinu prodiranja i osjetljivost metode. Porastom vodljivosti opada dubina prodiranja metode ali se povećava osjetljivost na površinske nepravilnosti. Električna vodljivost je definirana izrazom

$$G = \frac{1}{R},$$

gdje je R električni otpor materijala.

Geometrija uzorka je važna jer može otežati pristup pojedinim dijelovima uzorka te zbog činjenice da metoda može udubine u geometriji detektirati kao nepravilnosti, što smanjuje pouzdanost rezultata.

Udaljenost sonde i uzorka (zračnost) je bitna jer povećanjem zračnosti opada snaga magnetnog toka a time su i vrtložne struje slabije pa opadaju i osjetljivost i dubina prodiranja metode a time i sposobnost sustava.

Omjer signal/šum nam govori kakav je odnos korisnog i nekorisnog signala koji sonda prima. Šum je u pravilu posljedica lošeg stanja površine, utjecaja geometrije uzorka, nehomogenosti materijala ili nekog vanjskog izvora elektromagnetnog zračenja (elektromotori, generatori, REL uredaji...) ili mehaničkih vibracija ispitnog uzorka.

4.2. Faktori koji utječu na pouzdanost rezultata

Zbog različitih priroda raznih NDT metoda, svaka ima svoje izvore varijance i utjecaje na pouzdanost rezultata. Kvalitativni prikaz faktora koji utječu na pouzdanost rezultata je prikazan u [Tablica 4].

	materijal	oprema	procedura	kalibracija	kriterij	ljudski faktor
tekući penetrant	X		X			X
magnetne čestice	X	X	X			X
rendgen	X	X	X			X
virtložne struje (ručno)	X	X	X	X	X	X
virtložne struje (automatizirano)	X	X	X	X	X	
ultrazvuk (ručno)	X	X	X	X	X	X
ultrazvuk (automatizirano)	X	X	X	X	X	
termografija (ručno)		X	X	X	X	X
termografija (automatizirano)		X	X	X	X	

Tablica 4: Faktori koji utječu na pouzdanost rezultata pojedine metode [5]

Ispitivanje virtložnim strujama se koristi za brojna ispitivanja neravilnosti na površini ili blizu površine ispitnog uzorka. Uzorak mora biti električki vodljiv i omogućavati ravnomjeran dodir sa ispitnom sondom. Opći koraci ispitivanja su:

1. Sonda se postavlja na ispitni uzorak
2. Izmjenično magnetno polje se stvara u sondi pomoću izmjenične struje u zavojnici
3. Induciraju se virtložne struje u ispitnom uzorku
4. Jačina i faza induciranih virtložnih struja u uzorku se detektiraju tražećom sondom (diferencijske sonde) ili promjenom impedancije uzbudne sonde (apsolutne sonde)
5. Lokalna promjena u induciranoj struji sugerira postojanje neravilnosti u ispitnom uzorku
6. Ovisno o duljini na kojoj imamo promjenu amplitude signala i/ili faznom pomaku i iznosu te promjene određuje se veličina nepravilnosti

Za ispitivanje su potrebni specijalizirana oprema, sonde, etalon za kalibraciju opreme te pažljivo vođenje ispitnog procesa kako bi se osigurala ponovljivost ispitivanja. Metoda spada u volumetrijska ispitivanja te joj značajno opada rezolucija blizu rubova ispitnog uzorka i na mjestima gdje dolazi do promjena geometrije uzorka.

Kod ručnog ispitivanja se rezultati prikazuju kao otklon ili na osciloskopu te interpretacija rezultata ovisi o ispitivaču i njegovoj sposobnosti prepoznavanja uzoraka, jačini signala i položaju sonde. U slučaju višestrukih očitavanja i prolaza po uzorku rezultati mogu značajno odstupati. Trajni zapisi ispitivanja ne postoje.

Za razliku od ručnog ispitivanja, automatizirano provodi skener koji stalno bilježi položaj sonde te podatke o amplitudi i fazi signala te omogućava da se iz svih dobivenih rezultata napravi tlocrtni prikaz volumena cijelog uzorka. Rezolucija ovisi o koraku skenera te korištenim filterima signala. Izvještaj i prikaz površine se mogu automatski izraditi.

Ručno ispitivanje	
cijena ispitivanja	niska
cijena opreme	srednja
potrebna vještina ispitivača	visoka
zahtjevi za kontrolom procesa	srednja
varijanca procesa/granični zahtjevi	srednja
Automatizirano ispitivanje	
cijena ispitivanja	srednja
cijena opreme	visoka
potrebna vještina ispitivača	srednja
zahtjevi za kontrolom procesa	visoka
varijanca procesa/granični zahtjevi	niska

Tablica 5: Kvalitativni prikaz pojedinih utjecaja na rezultate EC mjerenja za ručno i automatizirano ispitivanje [5]

5. Analiza rezultata usporedbenih ispitivanja vrtložnim strujama

Zbog nemogućnosti da izvršimo vlastita usporedbeni mjerenja vrtložnim strujama, analizu rezultata u svrhu određivanja sposobnosti sustava i pouzdanosti rezultata s obzirom na vrstu sonde, ispitnu frekvenciju i vrstu materijala smo odradili na temelju ispitivanja koje su 2007. godine proveli Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) i U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) na glavnim dijelovima cijevnih vodova u reaktorima za potrebe provjera između održavanja. Za ispitivanje su kroišteni sljedeći uzorci:

1. dijelovi cjevovoda od ljevanog nehrđajućeg čelika sa oštećenjima zbog toplinskog i mehaničkog zamora (Westinghouse Owners Group)



Slika 11: Westinghouse Owners Group uzorci [5]

2. dijelovi s oštećenjima zbog toplinskog zamora (PNNL)
3. čisti cijevni sklop za španjolsku nuklearnu elektranu (posudba, Electric Power Research Institute NDE Center)



Slika 12: Uzorak za španjolsku nuklearnu elektranu [5]

4. tri manja čista cijevna sklopa grublje završne obrade (Southwest Research Institute)
5. čisti cijevni sklop od ljevanog nehrđajućeg čelika starije izrade (posudba, Westinghouse Owners Group)
6. čisti cijevni sklop od ljevanog nehrđajućeg čelika starije izrade (posudba, IHI Southwest Technologies Inc.)

Ispitivanja su provedena na unutarnjem radijusu dijelova koristeći Zetec MIZ-27SI uređaj i Zetec C Z0000857-1 točkastu sondu frekvencije 250 kHz. Ispitivanja su provedena automatiziranim sustavom.



Slika 13: Zetec MIZ-27SI uređaj

Od 26 uzoraka, 19 ih je imalo oštećenja a preostalih 7 je korišteno za ispitivanje utjecaja različite strukture materijala na rezultate mjerenja.

Stvarni iznos oštećenja prikazuje [Tablica 6] a rezultate dobivene ispitivanjem prikazuje [Tablica 7].

Specimen ID Descriptor	Flaw Location (Weld Side) and Material Type	Fatigue Crack Type	True State Flaw Depth (cm)	True State Flaw Length (cm)
APE-1	Elbow - SCSS	Mechanical	1.1	3.94
APE-4	Elbow - SCSS	Mechanical	1.2	4.19
INE-A-1	Elbow - SCSS	Mechanical	2.64	6.99
INE-A-4	Elbow - SCSS	Thermal	1.8	6.86
MPE-3	Elbow - SCSS	Mechanical	2.54	6.73
MPE-6	Elbow - SCSS	Thermal	1.5	5.92
ONP-D-2	Pipe - CCSS	Thermal	1.78	6.6
ONP-D-5	Pipe - CCSS	Mechanical	1.19	4.06
INE-A-5	Safe End - Wrought SS	Mechanical	2.54	6.73
ONP-3-5	Safe End - Wrought SS	Thermal	1.78	6.6
ONP-3-8	Nozzle - Wrought SS	Mechanical	1.78	5.13
OPE-2	Elbow - SCSS	Mechanical	1.27	4.19
OPE-5	Elbow - SCSS	Thermal	1.63	6.15
POP-7	Nozzle - SCSS	Mechanical	2.55	6.78
POP-8	Pipe - CCSS	Thermal	1.5	5.72
B-501	(+) Equiaxed	Thermal	2	2.92
B-504	(+) Columnar	Thermal	2.79	6.15
B-515	(+) Equiaxed	Thermally Stress Relieved- Mechanically Bent	1.52	2.92
B-519	(+) Equiaxed	Thermal	2.79	5.72
Metric units can be converted to English units by dividing by 2.54 (2.54 cm = 1 in.).				

Tablica 6: Sažetak ključnih stvarnih podataka za sve uzorke [6]

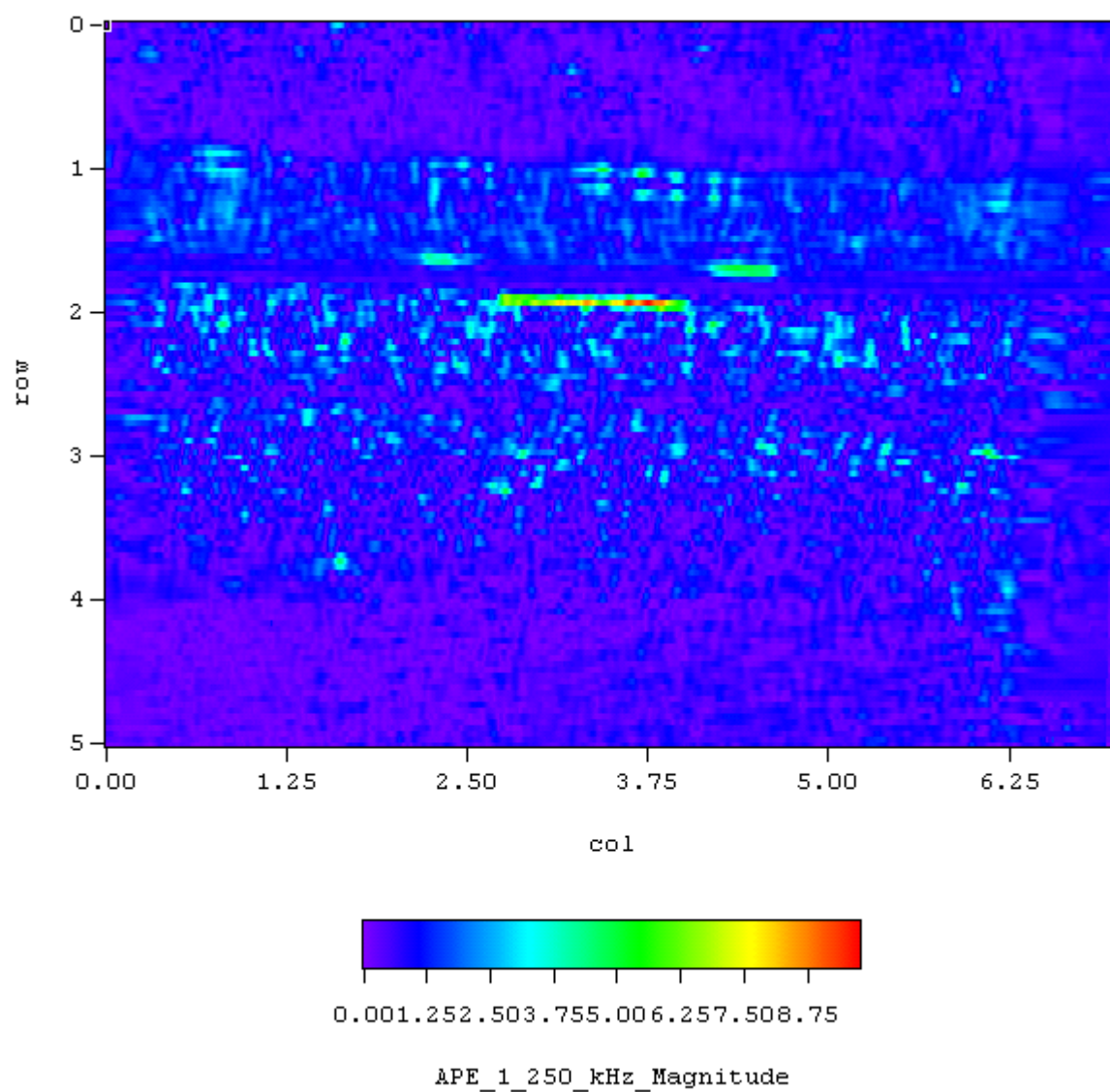
Kao što je vidljivo iz [Tablice 6], stvarne dubine nepravilnosti su prilično velike kada se uzme u obzir debljina zrakoplovnih dijelova stoga smo odlučili ne razmatrati sve uzorke kod kojih dubina nepravilnosti prelazi 20 mm. Unatoč činjenici da su nepravilnosti dimenzijski veće nego u zrakoplovstvu, navedeni primjeri su nam zanimljivi jer su izvori nepravilnosti dinamički i toplinski zamor koji su u zrakoplovstvu vrlo zastupljeni.

Specimen ID Descriptor	Was Flaw Detected?/ Did Degaussing Improve SNR?	Peak Magnitude from Flaw (volts) and SNR (decibels)		Range of Phase Response from Flaw (deg.)	Measured Flaw Length (cm)	True State Flaw Length (cm)	True State Flaw Depth (cm)
		V	dB				
APE-1	Yes/No	9.77	11.8	92° - 97°	3.82	3.94	1.1
APE-4	Yes/No	8.00	16.1	50° - 115°	4.11	4.19	1.27
INE-A-4	Yes/No	10.20	11.4	270° - 282°	5.9	6.86	1.85
MPE-6	Yes/No	8.42	10.5	270° - 285°	3.8	5.92	1.5
ONP-3-5	Yes/No	5.75	21.2	70° - 110°	6.4	6.6	1.78
ONP-3-8	Yes/Yes	1.20	10.7	50° - 120°	4.21	5.13	1.78
ONP-D-2	Yes/Yes	9.18	13.9	250° - 285°	5.49	6.6	1.78
ONP-D-5	Yes/No	6.58	16.4	260° - 275°	3.73	4.06	1.19
OPE-2	Yes/Yes	6.25	8.0	105° - 130° 7° - 38°	4.37	4.19	1.27
OPE-5	Yes/Yes	8.06	11.1	70° - 105°	5.58	6.15	1.63
POP-8	Yes/No	9.25	15.8	230° - 258° 80° - 150°	6.02	5.72	1.5
B-501	Yes/No	8.42	12.5	45° - 130°	2.84	2.92	2
B-515	Yes/Yes	5.86	13.4	85° - 105°	2.87	2.92	1.52
Metric units can be converted to English units by dividing by 2.54 (2.54 cm = 1 in.).							

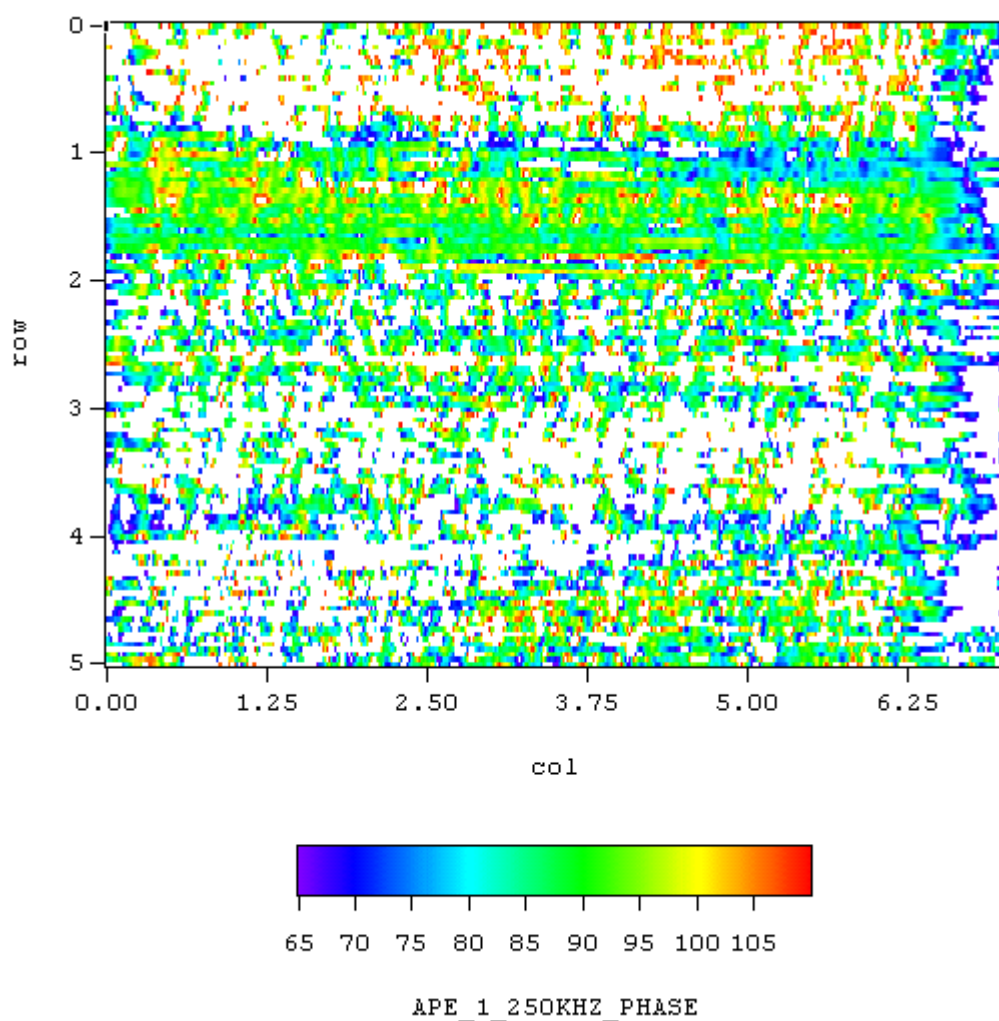
Slika 14: Sažetak ključnih rezultata ispitivanja za odabrane uzorke; omjer signal/šum je naveden nakon provedenog demagnetiziranja [6]

Analiza rezultata prema [6] slijedi.

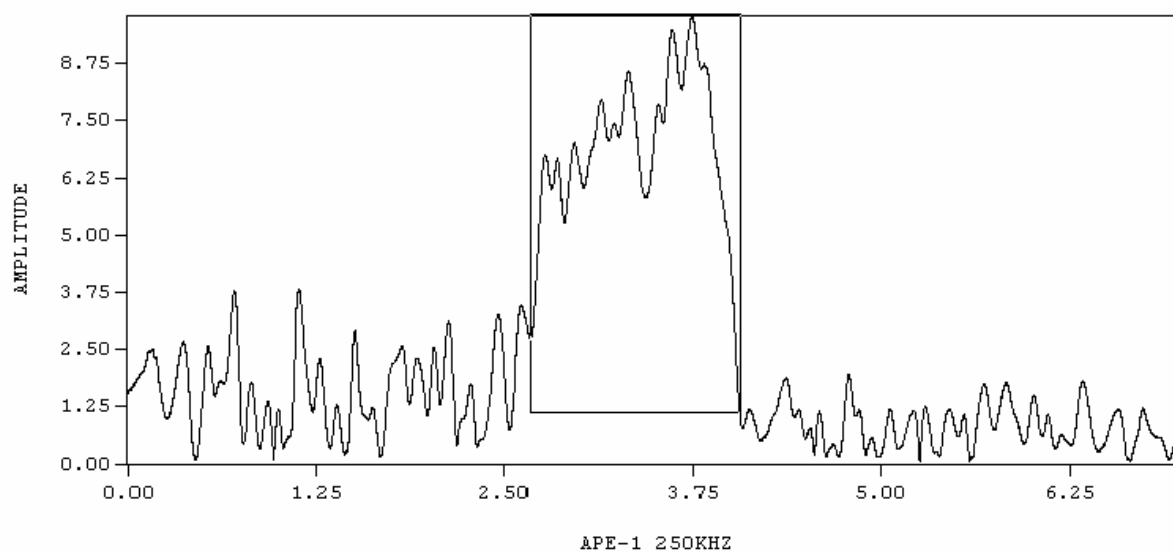
Na uzorku APE-1 je amplituda signala ([Slika 15]) pokazala značajna odstupanja na mjestima gdje se nalaze nepravilnosti dok fazni pomaci ([Slika 16]) nisu uopće ukazivali na postojanje nepravilnosti. Demagnetiziranje uzorka nije utjecalo na rezultate ispitivanja. Duljina nepravilnosti je očitana s obzirom na duljinu gubitka signala te je za 1,2 mm kraća od stvarne duljine.



Slika 15: Promjena amplitude signala za uzorak APE-1 [6]

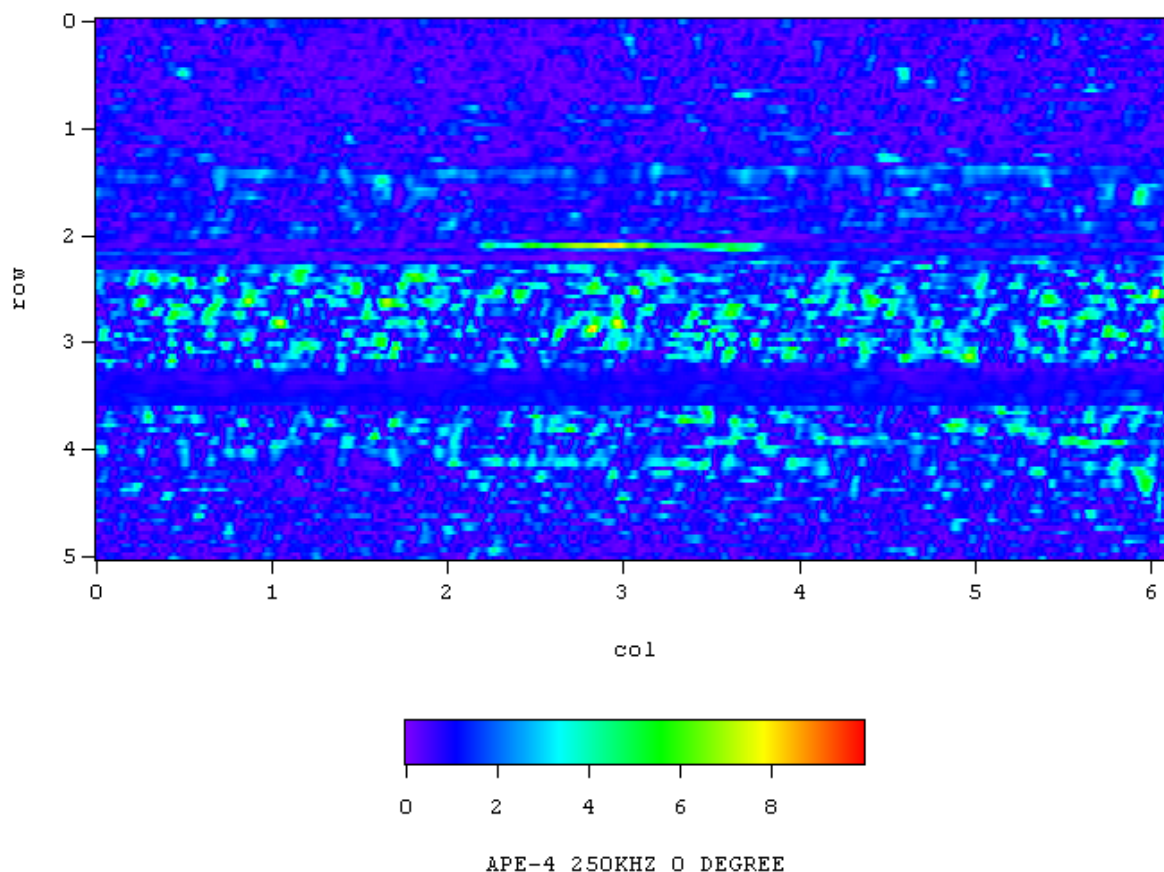


Slika 16: Fazni pomak za uzorak APE-1 [6]

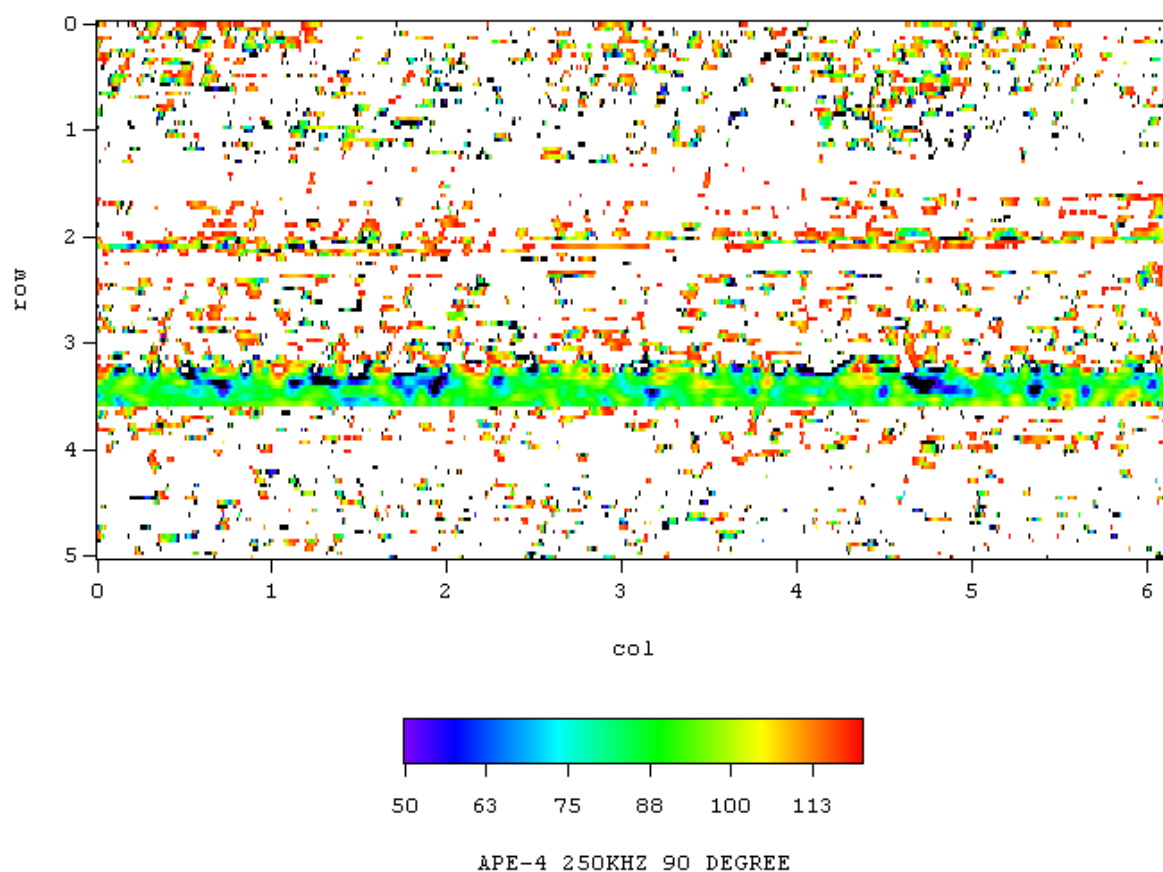


Slika 17: Linijski prikaz za uzorak APE-1 [6]

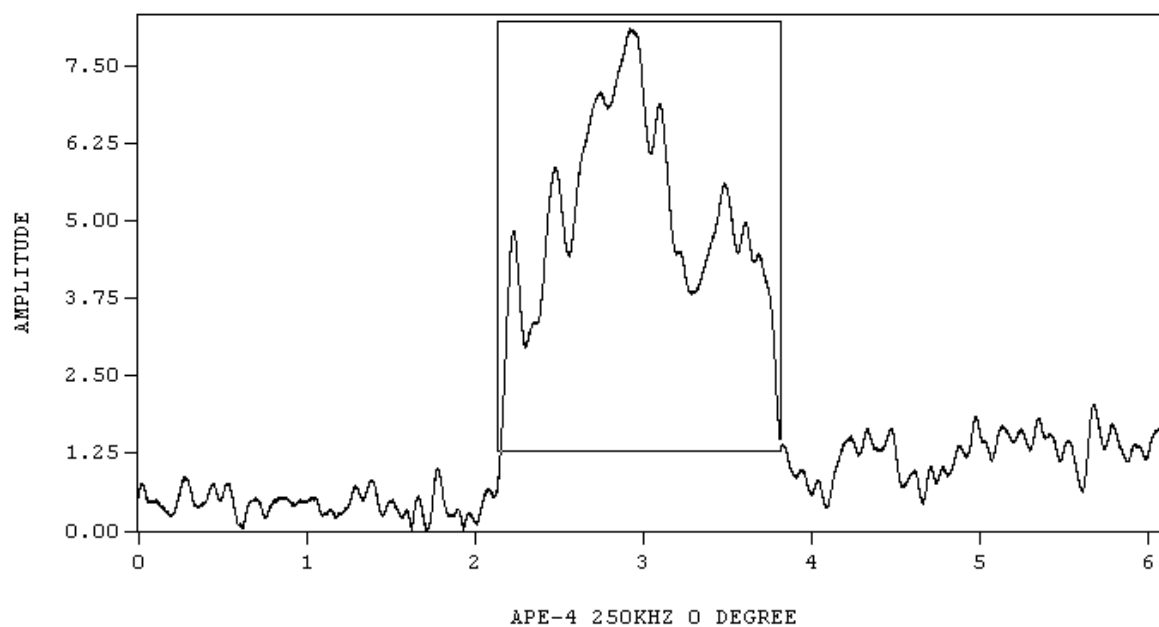
Kod uzroka APE-4 je nepravilnost razdvojena od šuma jedino promatranjem amplitude signala ([Slika 19]) dok se praćenjem faznog pomaka ([Slika 20]) nije uspjelo razaznati razliku između šuma i nepravilnosti. Promjena amplitude signala je lako pokazala postojanje nepravilnosti dok je fazni pomak samo mjestimično pokazivao značajnija odstupanja pa ih je bilo nemoguće sa sigurnošću razaznati kao nepravilnosti a ne šum. Demagnetiziranje nije pomoglo. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 0,8 mm kraća od stvarne duljine.



Slika 18: Promjena amplitude signala za uzorak APE-4 [6]

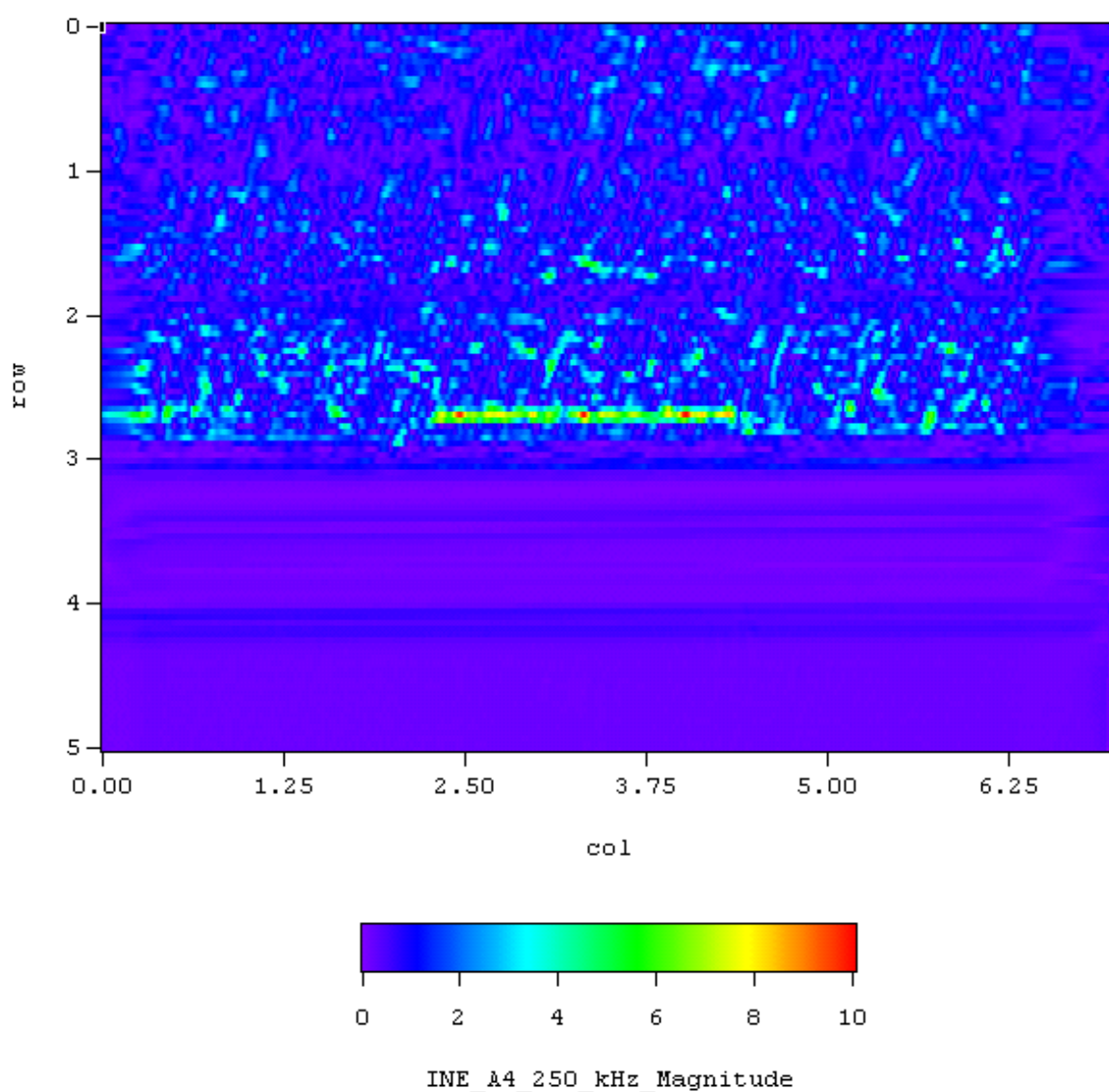


Slika 19: Fazni pomak za uzorak APE-4 [6]

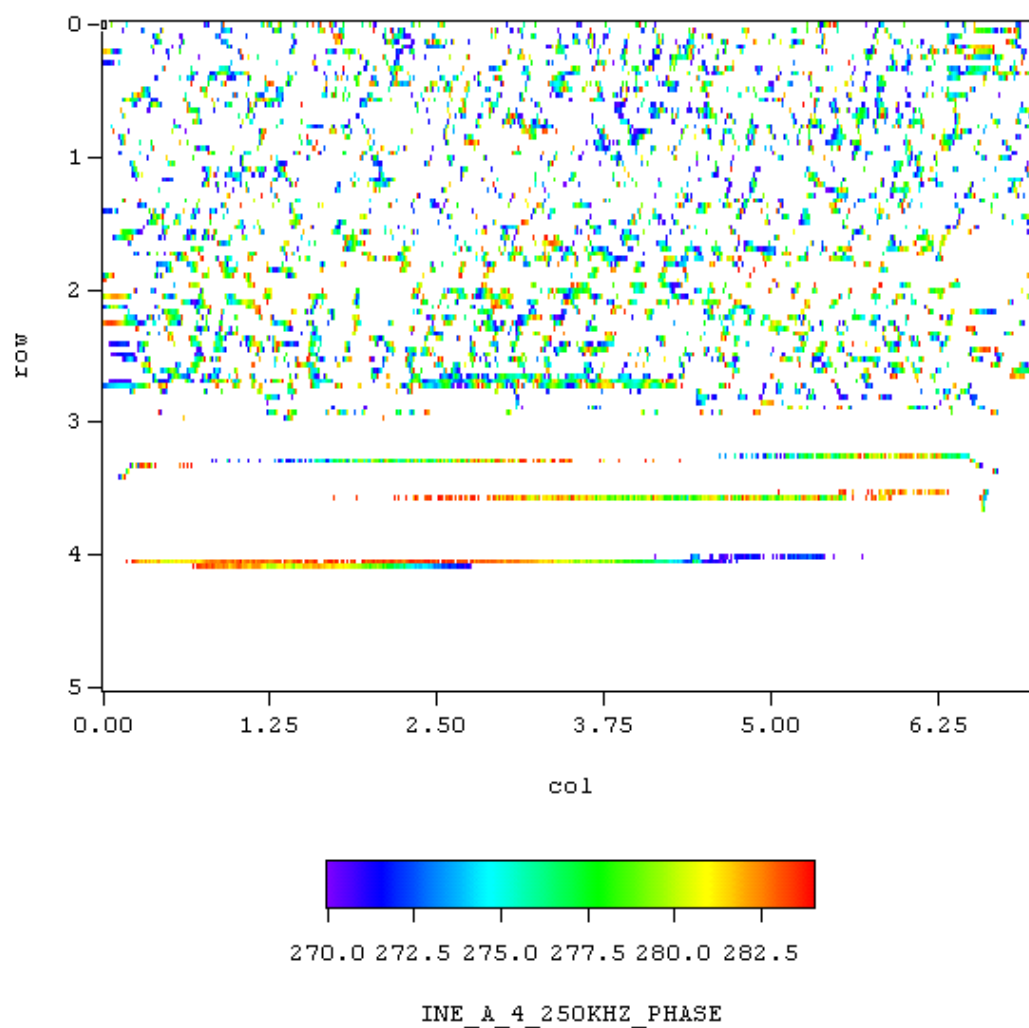


Slika 20: Linijski prikaz za uzorak APE-4 [6]

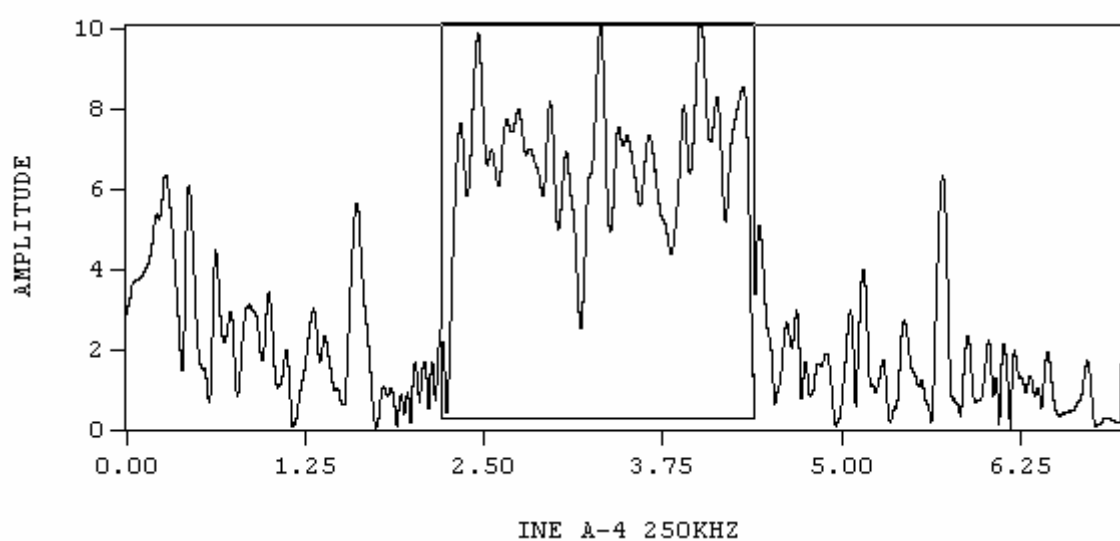
Uzorak INE-A-4 sadrži nepravilnost koja je razgranata na krajevima (pod kutem u odnosu na obodni smjer cijevi) te manja proširenja i grananja oko sredine nepravilnosti. Praćenje promjene amplitude signala ([Slika 21]) je pokazalo postojanje nepravilnosti u obodnom smjeru cijevi ali ne i razgranate dijelove dok je praćenje faznog pomaka ([Slika 22]) pokazalo mjestimična postojanja nepravilnosti u obodnom smjeru cijevi. Pomoću rezultata dobivenih praćenjem promjene amplitude signala određene su postojanje te lokacija i dimenzija nepravilnosti. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 9,6 mm manja od stvarne a demagnetizacija uzorka nije dovela do boljih rezultata.



Slika 21: Promjena amplitude signala za uzorak INE-A-4 [6]

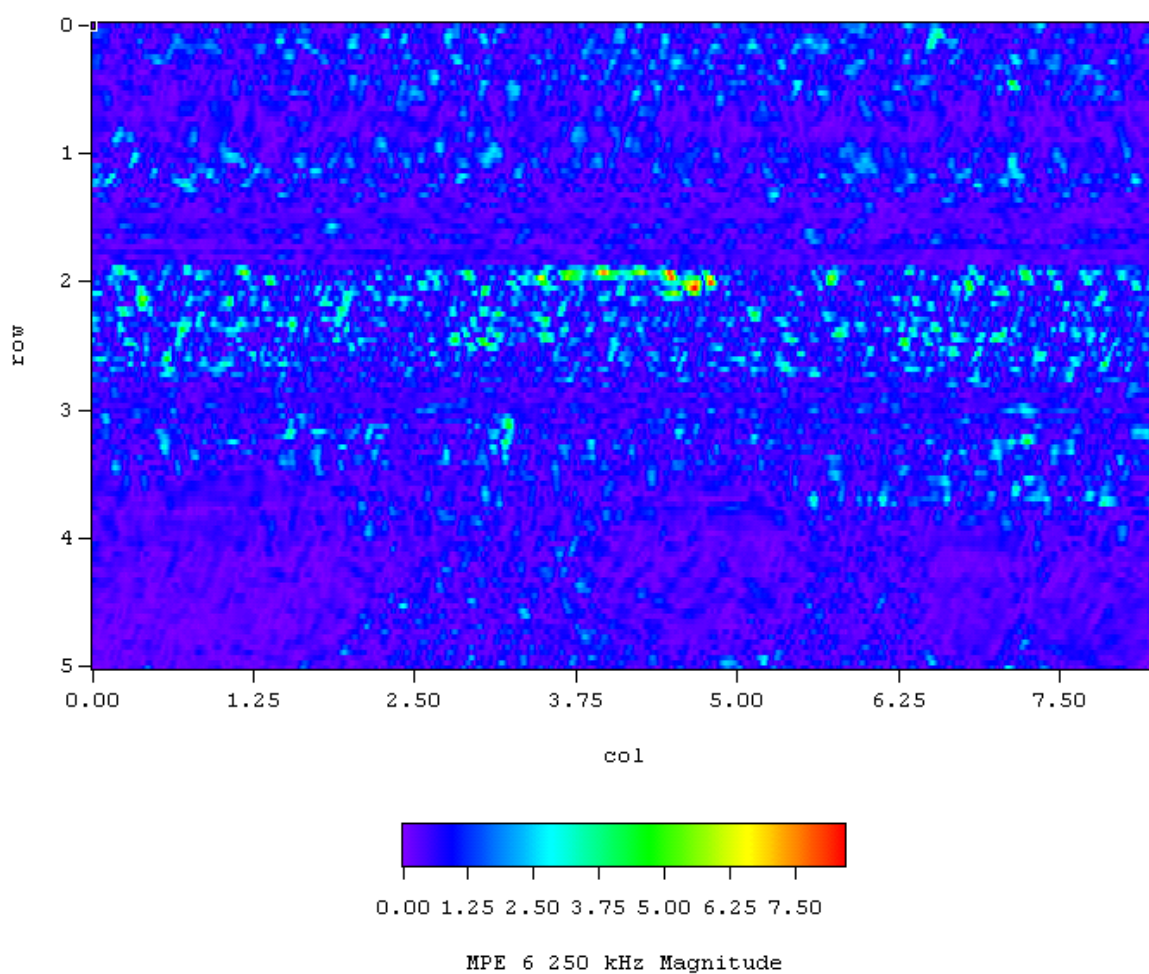


Slika 22: Fazni pomak za uzorak INE-A-4 [6]

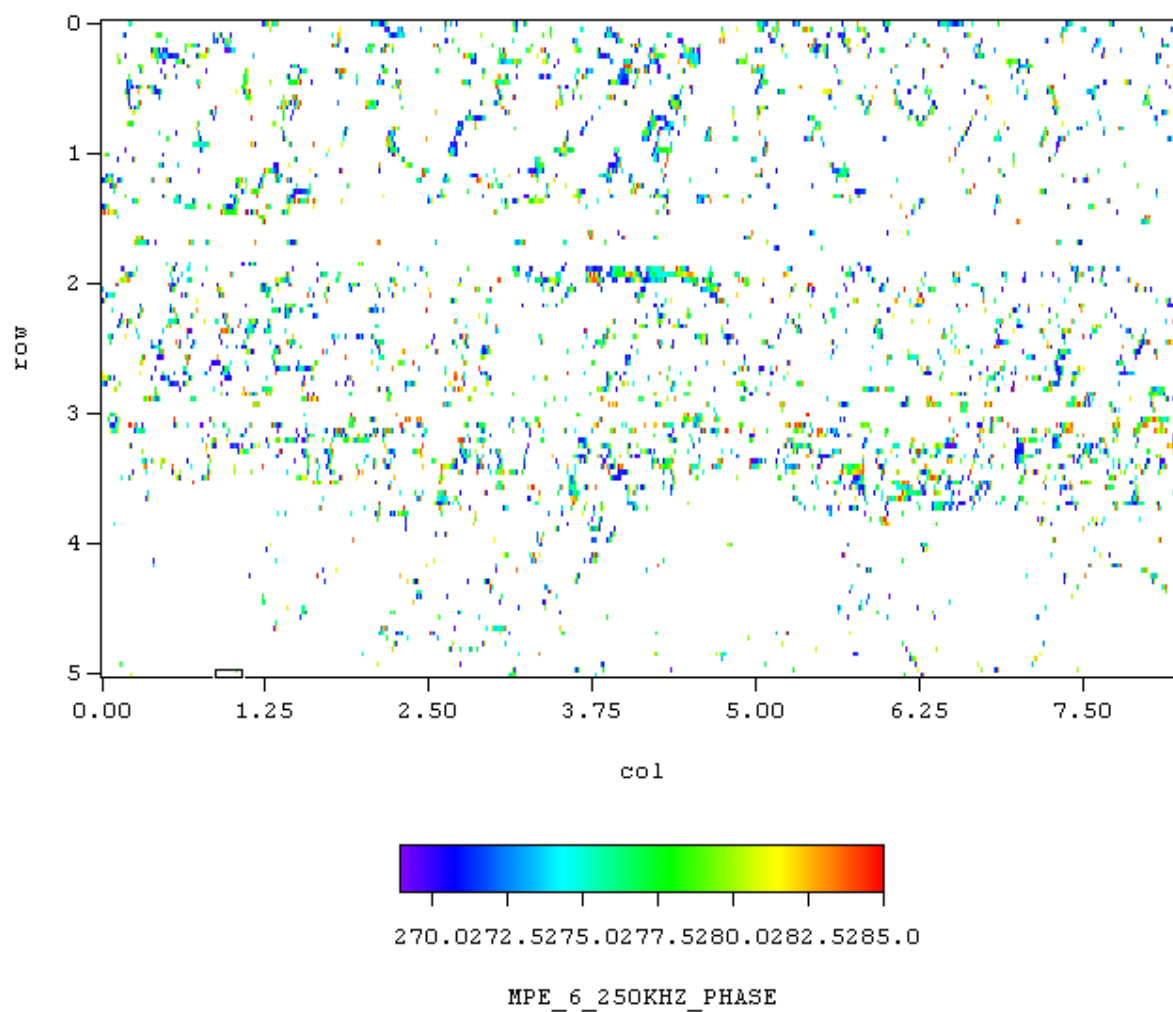


Slika 23: Linijski prikaz za uzorak INE-A-4 [6]

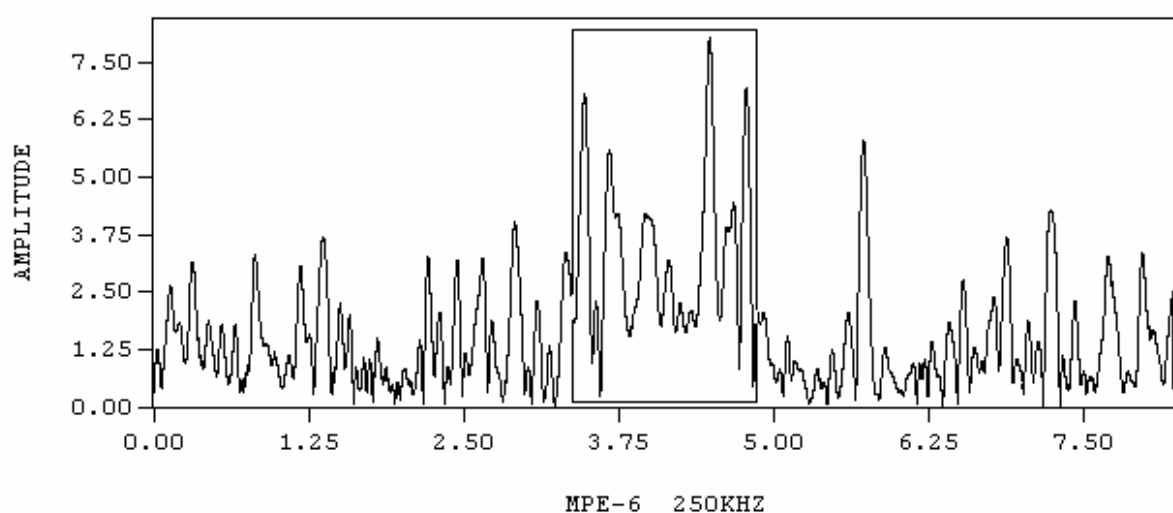
Uzorak MPE-6 sadrži razgranatu nepravilnost, slično kao i INE-A-4, s time da su u ovom slučaju razgranatosti zakrenute i u odnosu na obodnu i u odnosu na uzdužnu os na krajevima i oko sredine nepravilnosti. Kao i kod INE-A-4, promjene u amplitudi signala ([Slika 24]) su pokazale postojanje nepravilnosti u obodnom smjeru ali razgranatosti nisu uočene. Fazni pomak ([Slika 25]) je pokazao djelomično postojanje nepravilnosti u obodnom smjeru. Demagnetizacija nije poboljšala rezultate. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 21,1 mm kraća od stvarne.



Slika 24: Promjena amplitude signala za uzorak MPE-6 [6]

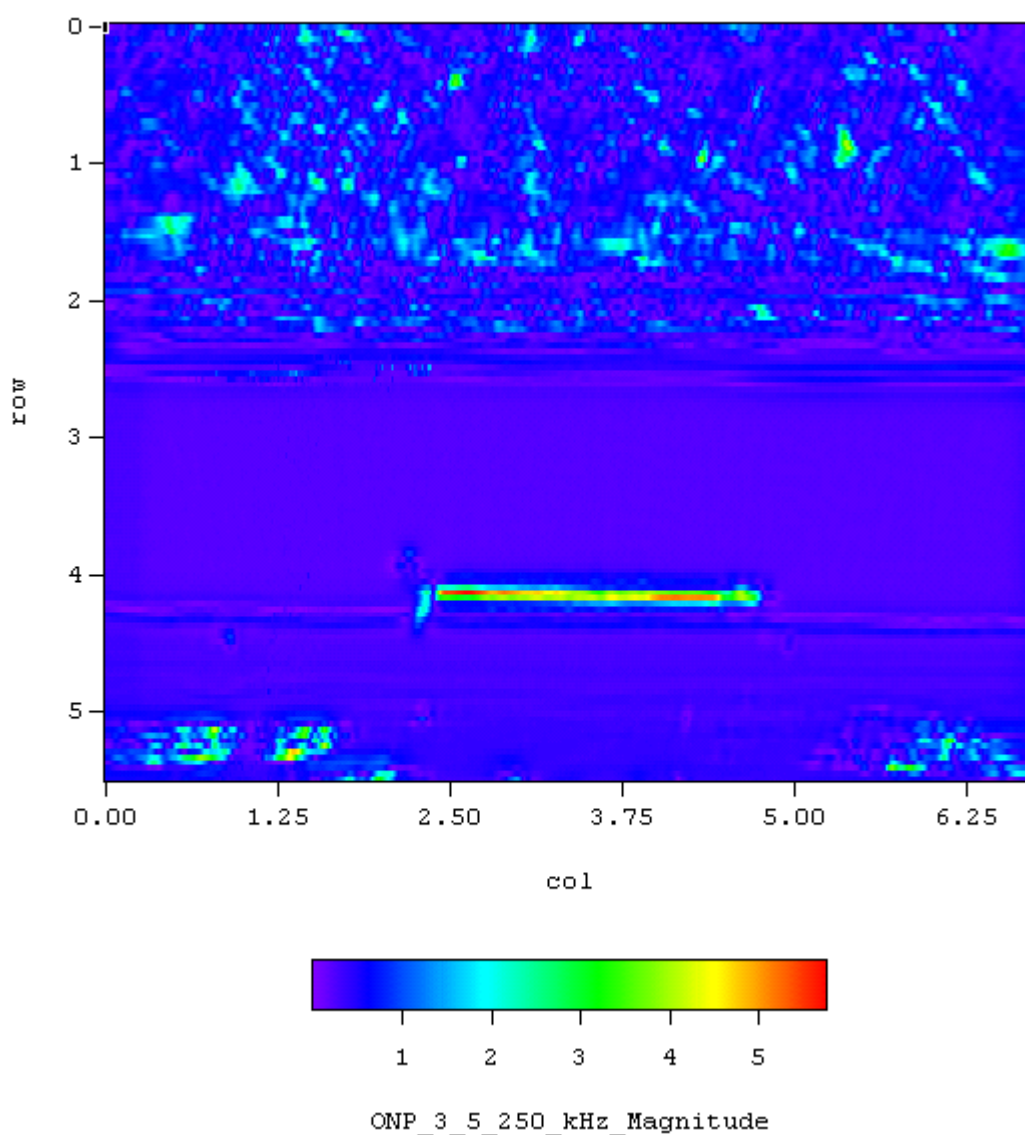


Slika 25: Fazni pomak za uzorak MPE-6 [6]

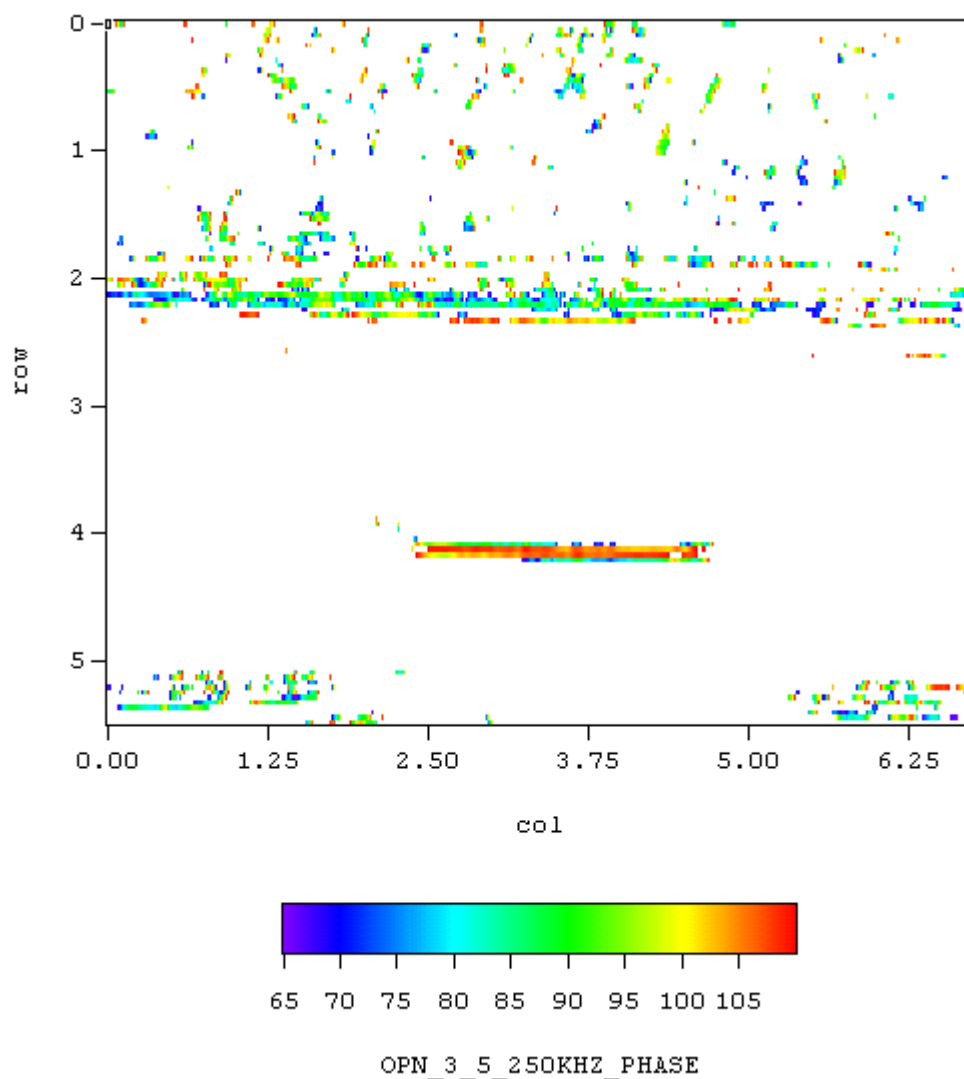
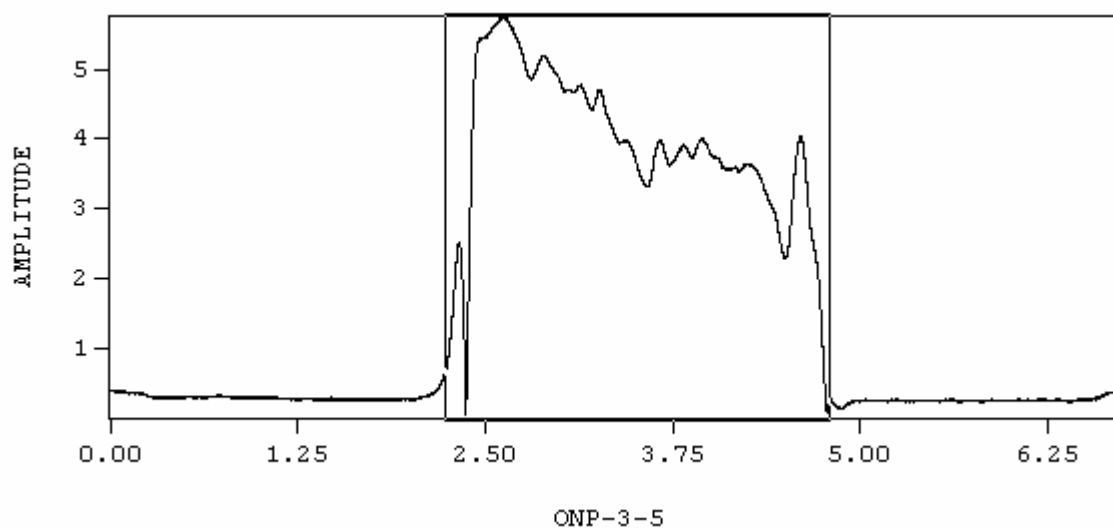


Slika 26: Linijski prikaz za uzorak MPE-6 [6]

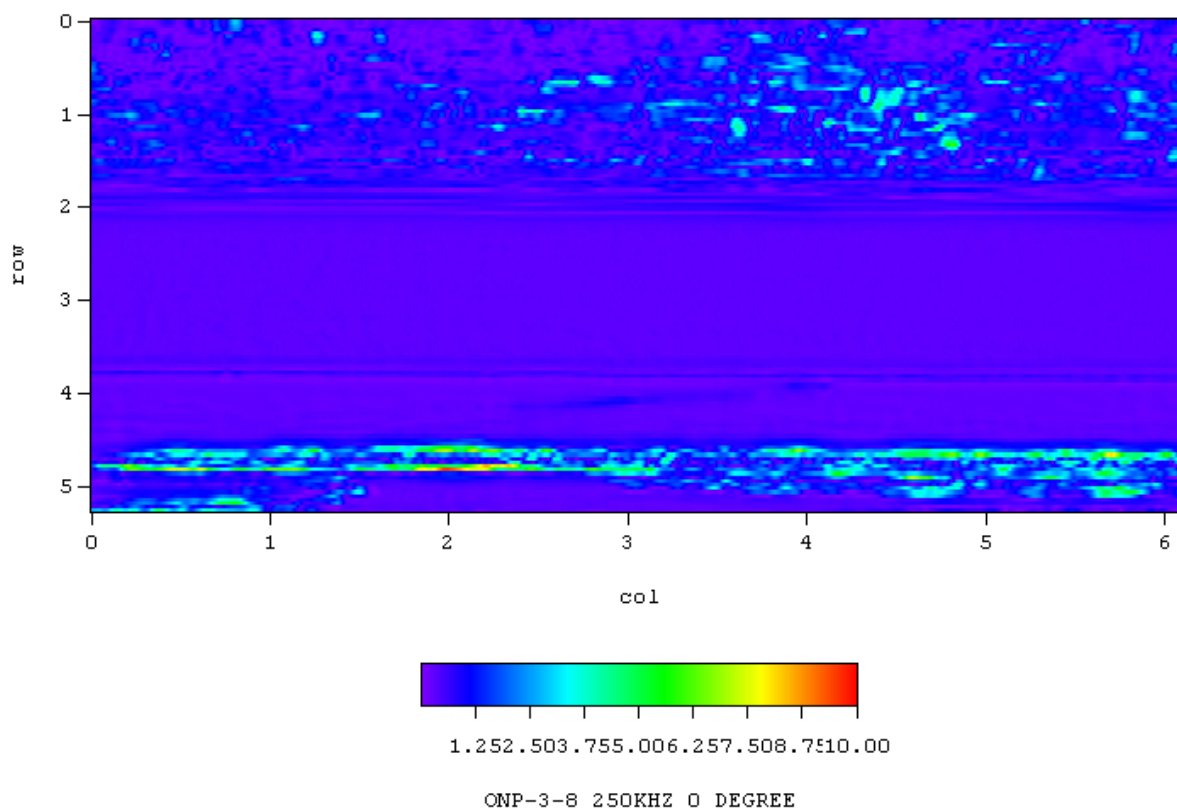
Uzorak ONP-3-5 sadrži nepravilnost razgranatu na krajevima te s malim granama oko sredine. S obzirom da se nepravilnost nalazi na mjestu na kojem ima vrlo malo pozadinskih šumova, praćenje promjene amplitude signala ([Slika 27]) te faznog pomaka ([Slika 28]) su vrlo jasno pokazali postojanje nepravilnosti, njenu lokaciju i dimenziju. Promjena amplitude signala ovog uzroka je dala veći omjer signal/šum nego bilo koji drugi uzorak u sklopu ovog ispitivanja, što znači da je u ovom slučaju utjecaj šuma bio najslabiji. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 2 mm kraća od stvarne.



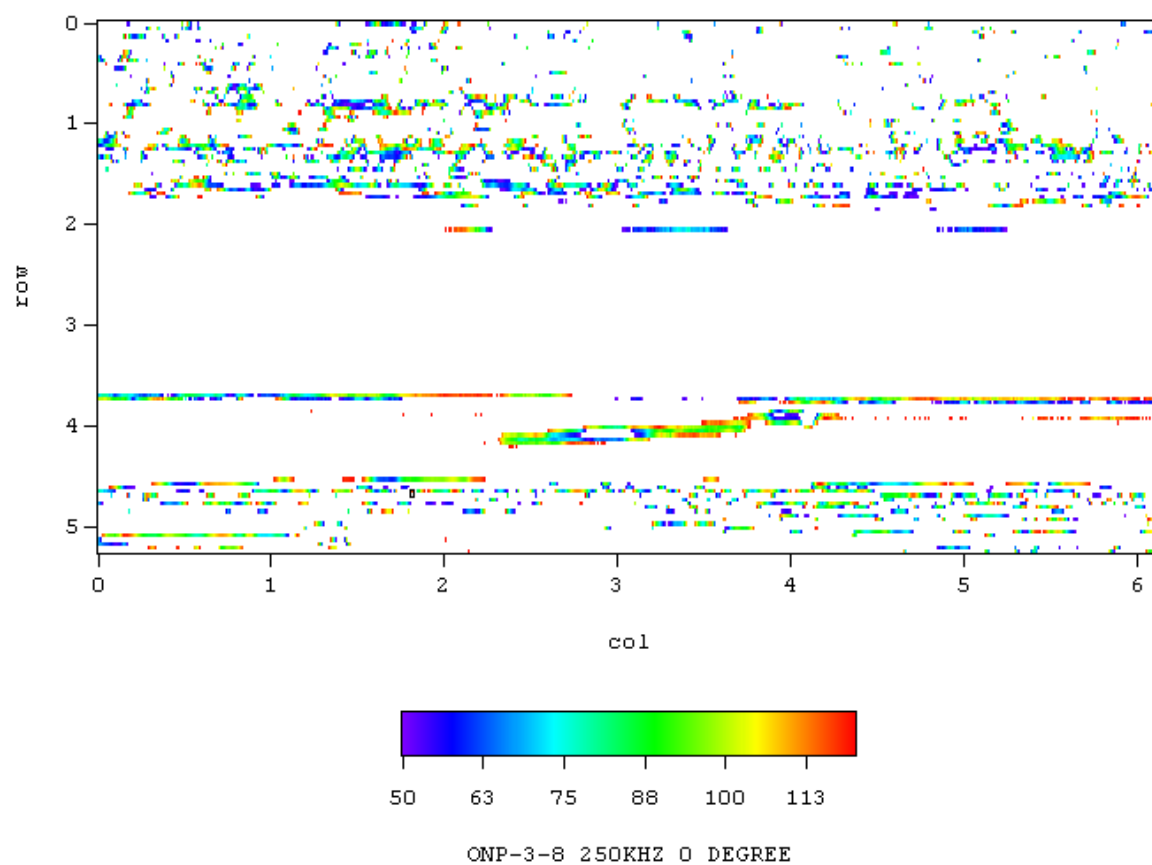
Slika 27: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-3-5 [6]

**Slika 28: Fazni pomak za uzorak ONP-3-5 [6]****Slika 29: Linijski prikaz za uzorak ONP-3-5 [6]**

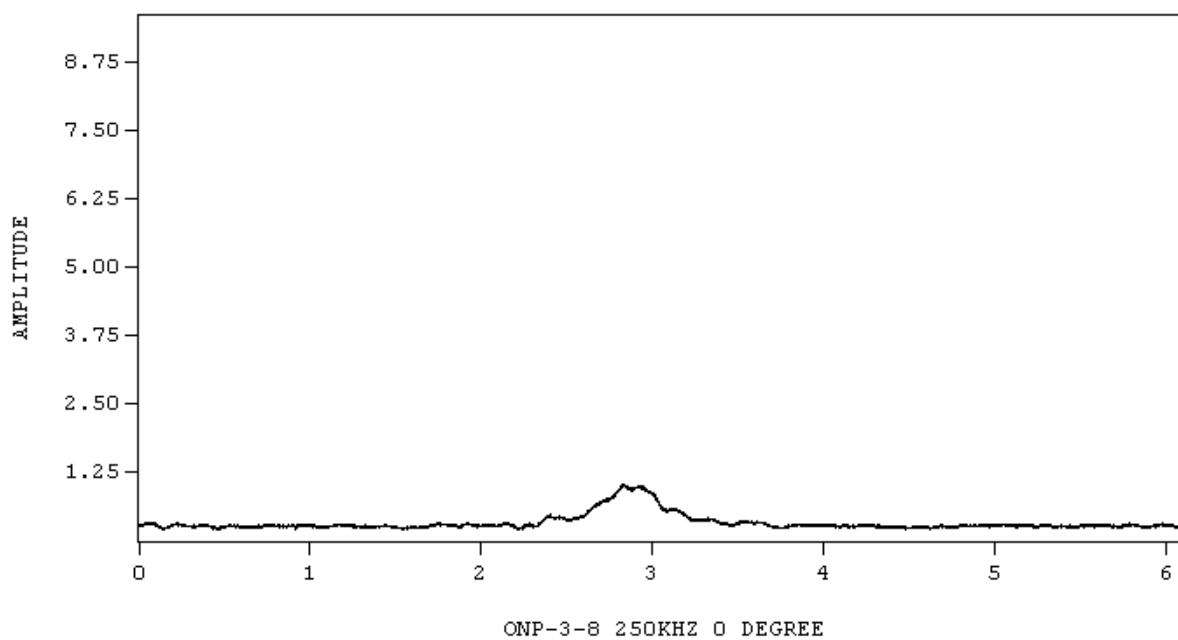
Kod uzorka ONP-3-8 je nepravilnost otkrivena na mjestu gdje nema puno pozadinskog šuma pa su i promjene amplitude signala ([Slika 30]) i fazni pomak ([Slika 31]) pokazali postojanje, lokaciju i dimenziju nepravilnosti. Demagnetiziranje uzorka je dovelo do poboljšanja rezultata. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 9,2 mm kraća od stvarne.



Slika 30: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-3-8 [6]

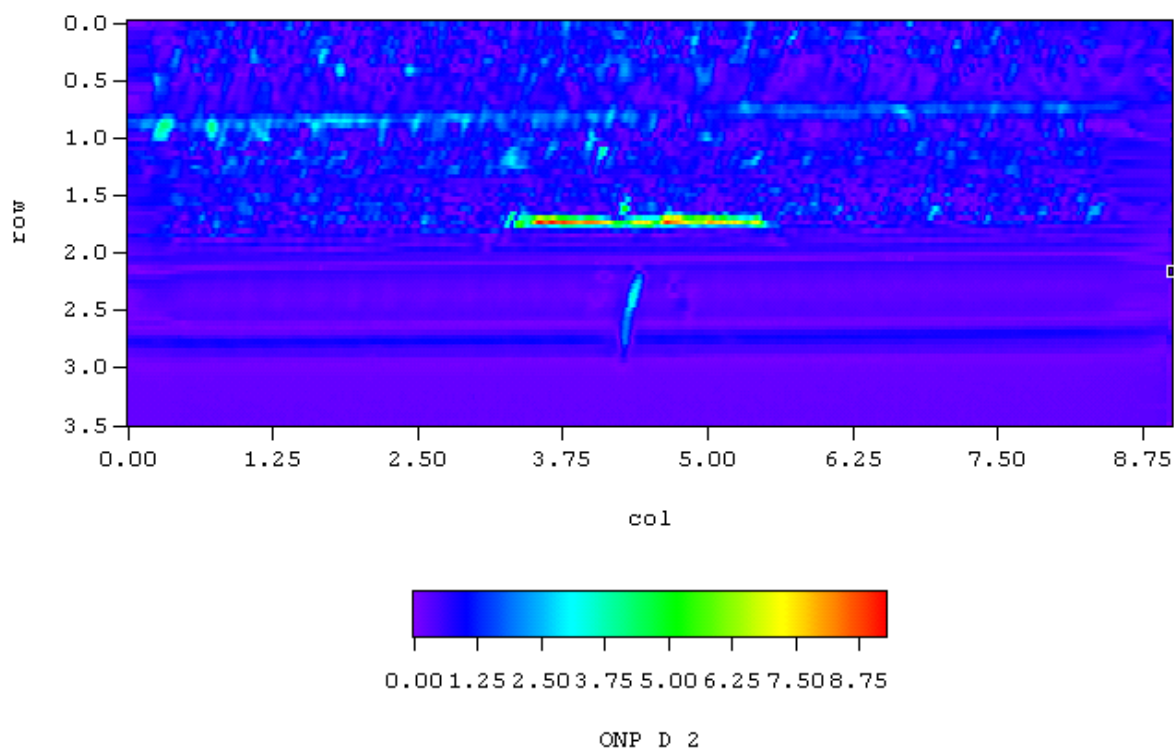


Slika 31: Fazni pomak za uzorak ONP-3-8 [6]

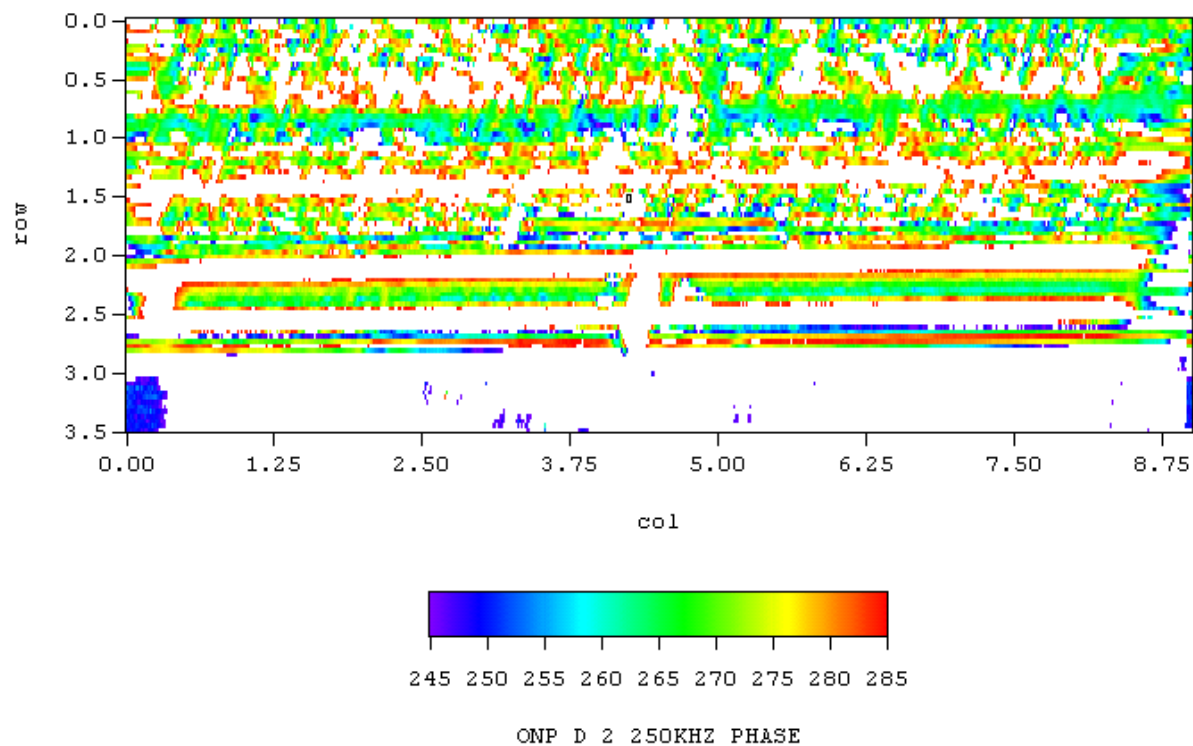


Slika 32: Linijski prikaz za uzorak ONP-3-8 [6]

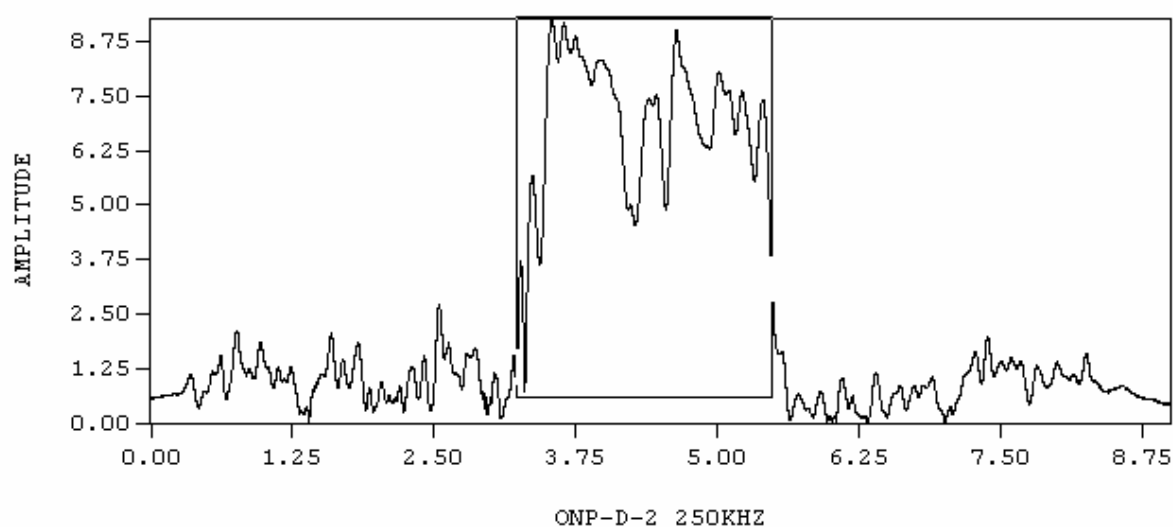
Uzorak ONP-D-2 ima nepravilnost s više glavnih smjerova širenja, zakretanjem u odnosu na uzdužni smjer te dodatnu nepravilnost s razgranatostima na oba kraja u obodnom smjeru. Dva mjesta na kojima su nakupine manjih nepravilnosti su bili teško uočljivi ali su veći dijelovi glavnih razgranatosti bili otkriveni i mjerenjem promjene amplitude signala ([Slika 33]) i faznog pomaka ([Slika 34]). Demagnetizacija je dovela do značajnog smanjenja pozadinskog šuma te time i do bolje detekcije glavnog dijela nepravilnosti u obodnom smjeru. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 11,1 mm kraća od stvarne.



Slika 33: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-D-2 [6]

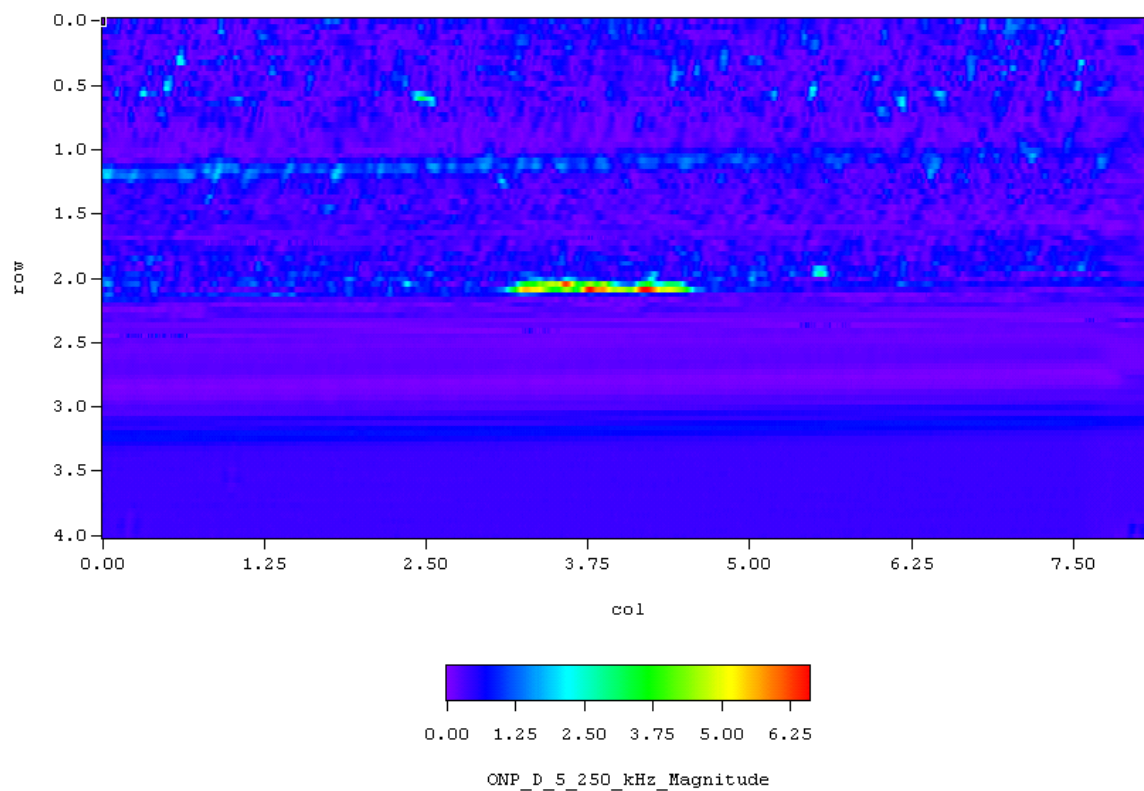


Slika 34: Fazni pomak za uzorak ONP-D-2 [6]

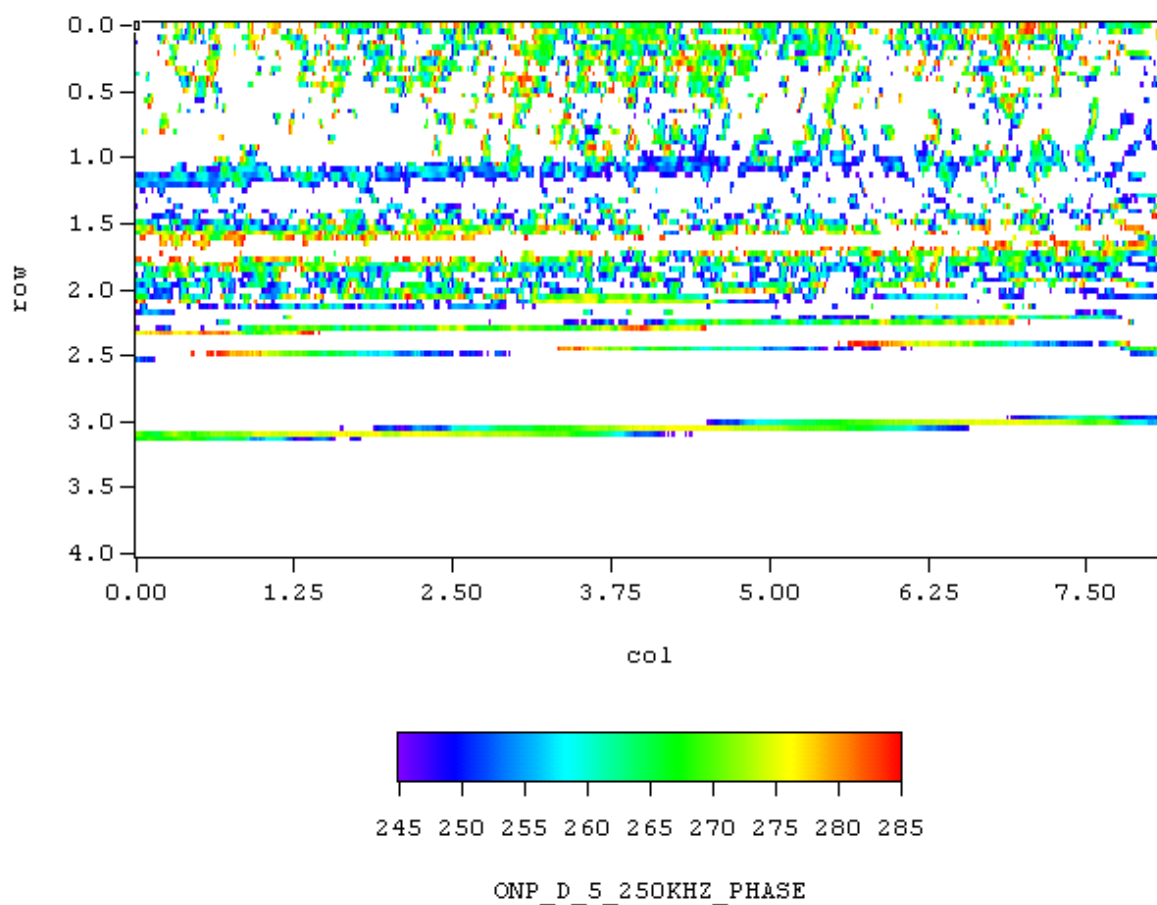


Slika 35: Linijski prikaz za uzorak ONP-D-2 [6]

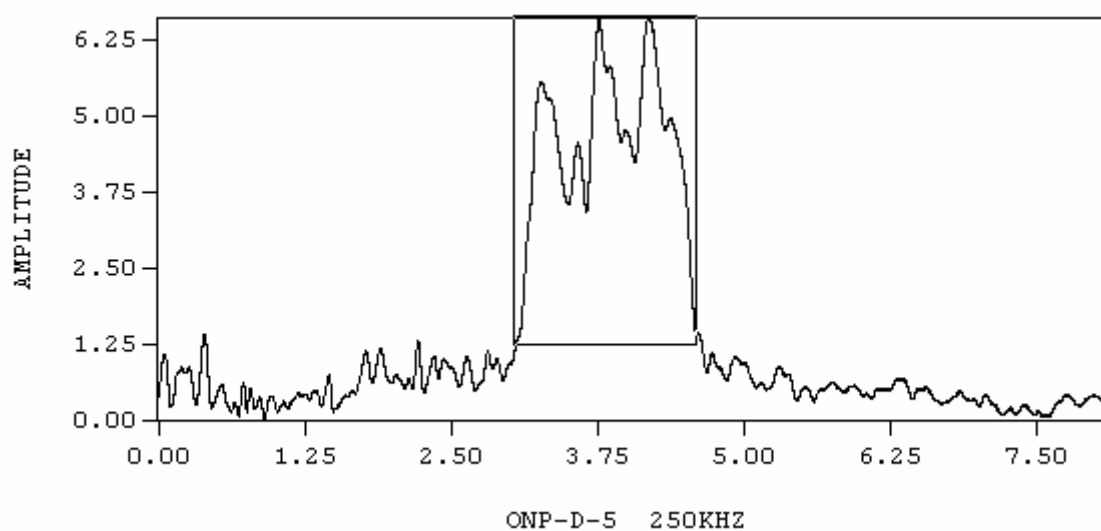
Kod uzorka ONP-D-5 je nepravilnost otkrivena te su joj određene lokacija i dimenzije i pomoću praćenja promjene amplitude signala ([Slika 36]) i faznog pomaka ([Slika 37]). S obzirom da nije bilo puno pozadinskog šuma, demagnetiziranje uzorka nije značajno utjecalo na rezultate. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 3,3 mm kraća on stvarne.



Slika 36: Promjena amplitude signala za uzorak ONP-D-5 [6]

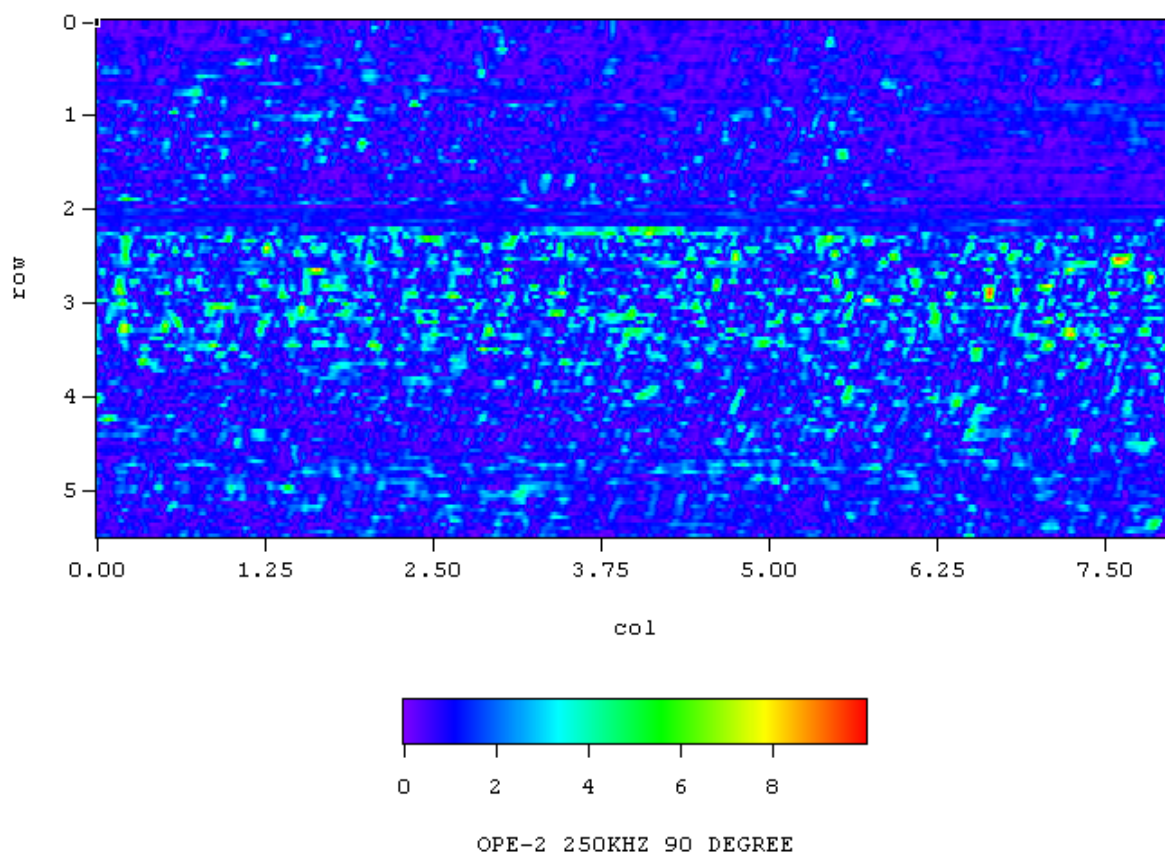


Slika 37: Fazni pomak za uzorak ONP-D-5 [6]

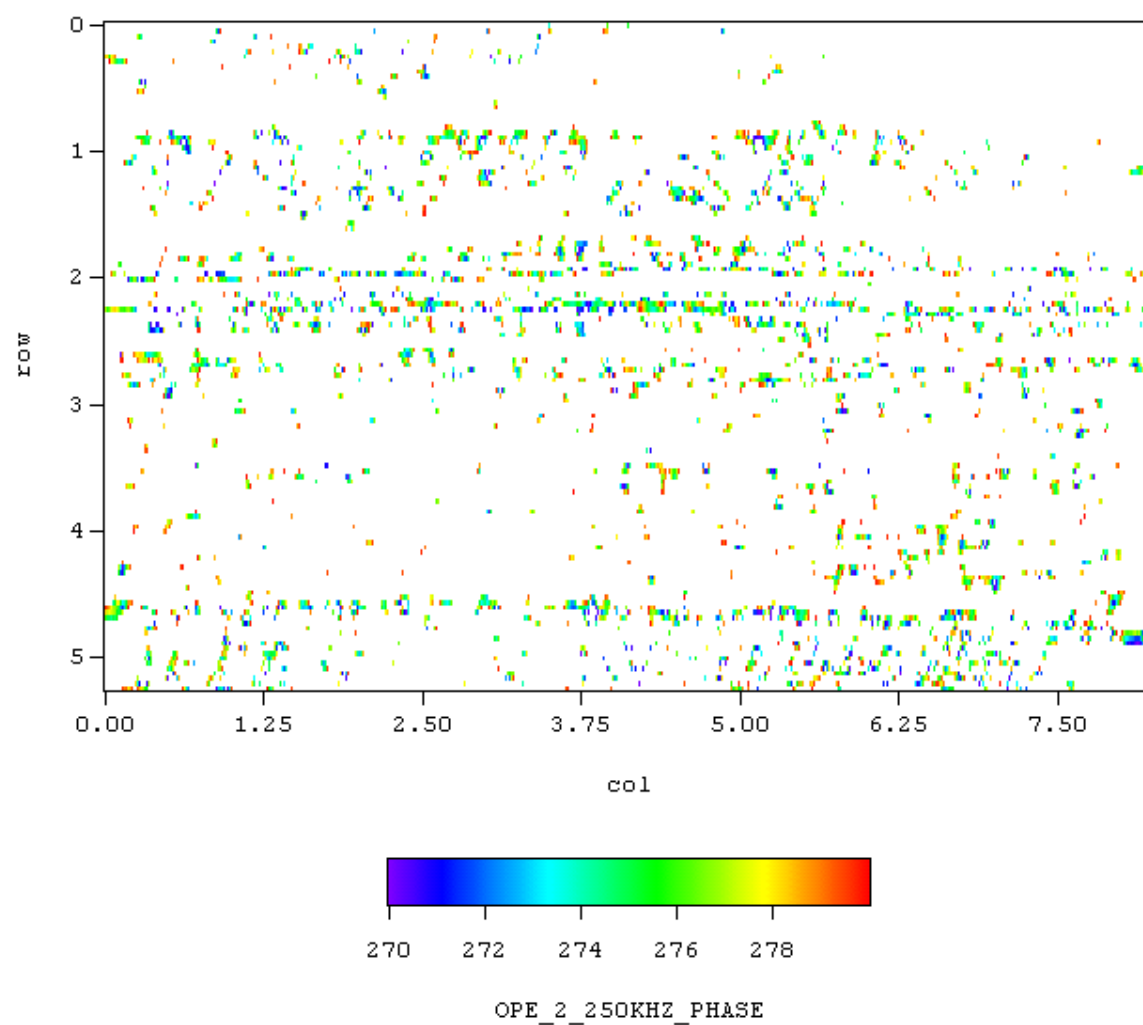


Slika 38: Linijski prikaz za uzorak ONP-D-5 [6]

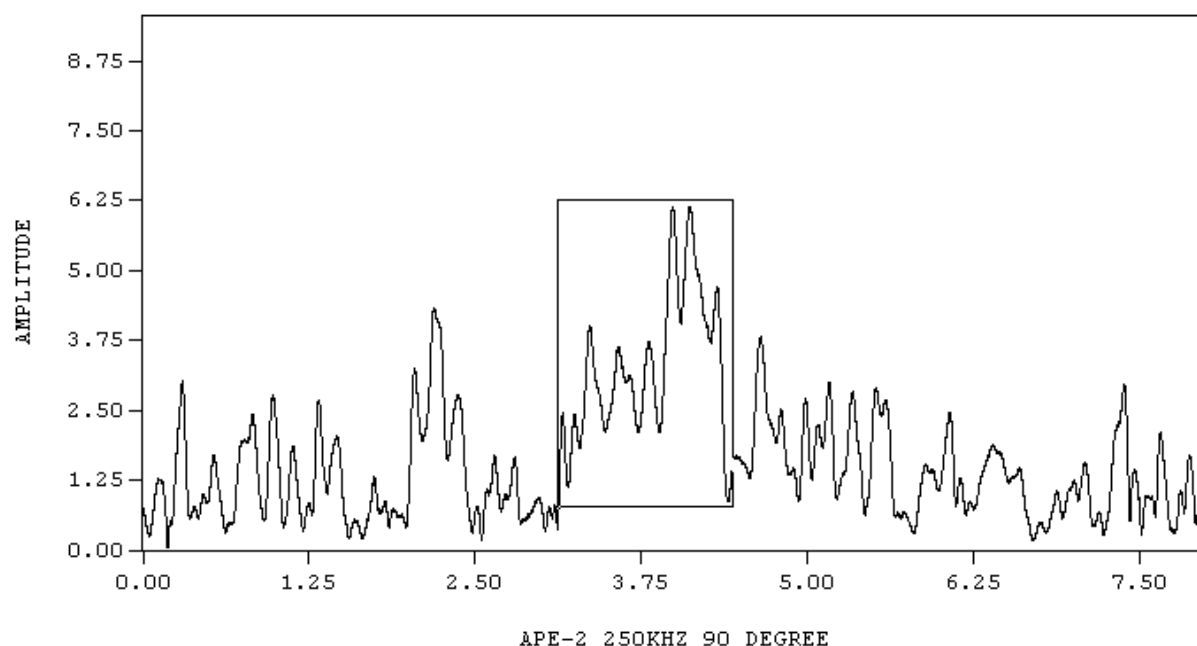
Kod uzorka OPE-2 je nepravilnost otkrivena samo pomoću praćenja promjene amplitude signala ([Slika 39]) te linijskog prikaza ([Slika 41]) dok je praćenje faznog pomaka ([Slika 40]) zbog pozadinskog šuma otkrilo samo manji dio nepravilnosti. Demagnetiziranje uzorka je dalo značajna poboljšanja te je krajnja izmjerena duljina nepravilnosti za 1,8 mm manja od stvarne.



Slika 39: Promjena amplitude signala za uzorak OPE-2 [6]

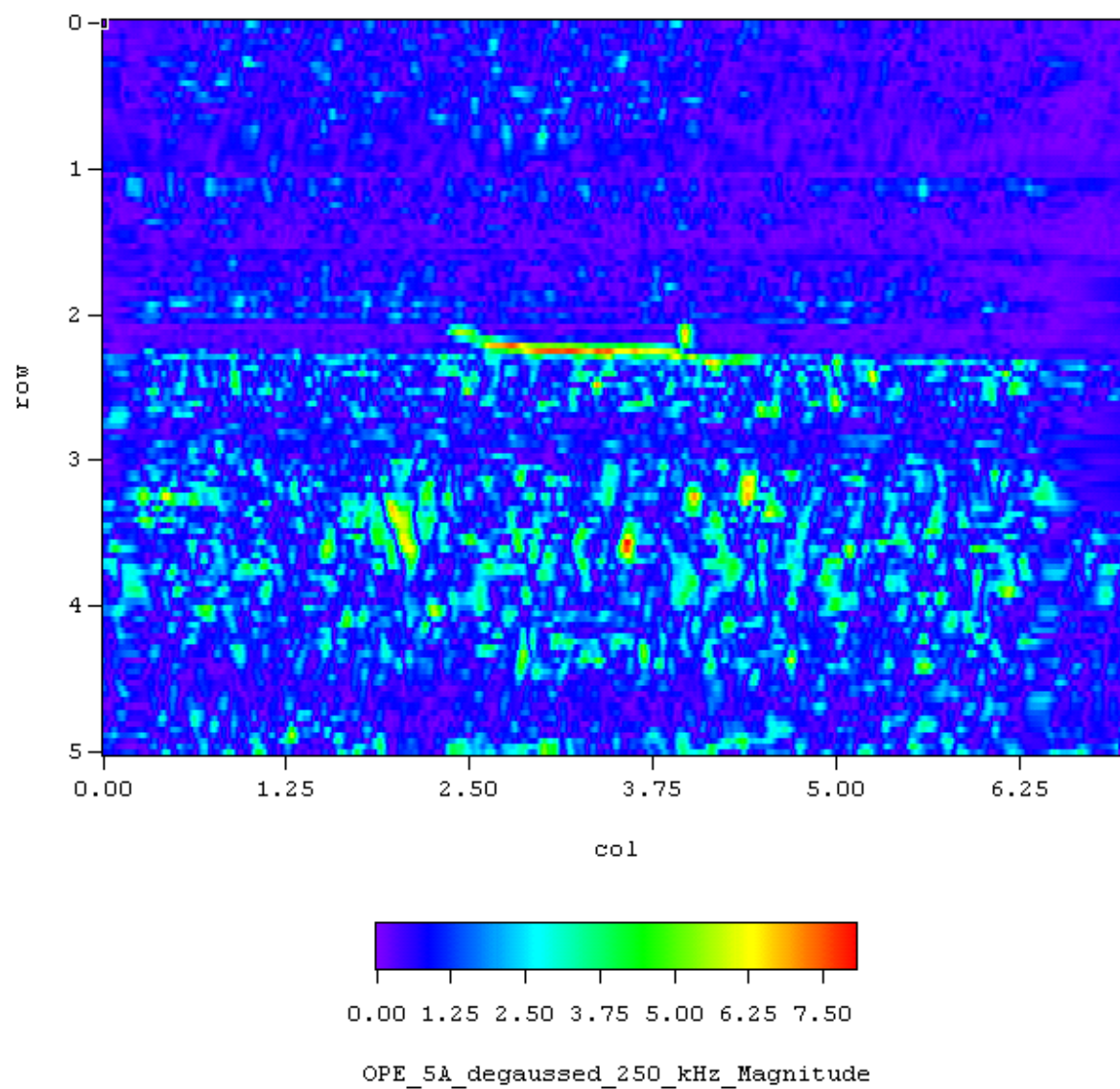


Slika 40: Fazni pomak za uzorak OPE-2 [6]

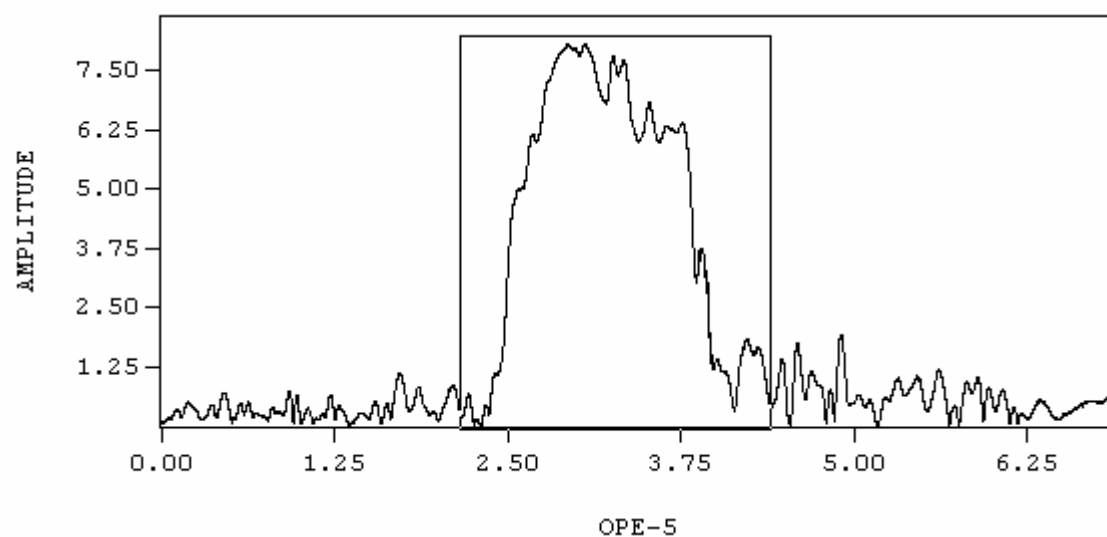


Slika 41: Linijski prikaz za uzorak OPE-2 [6]

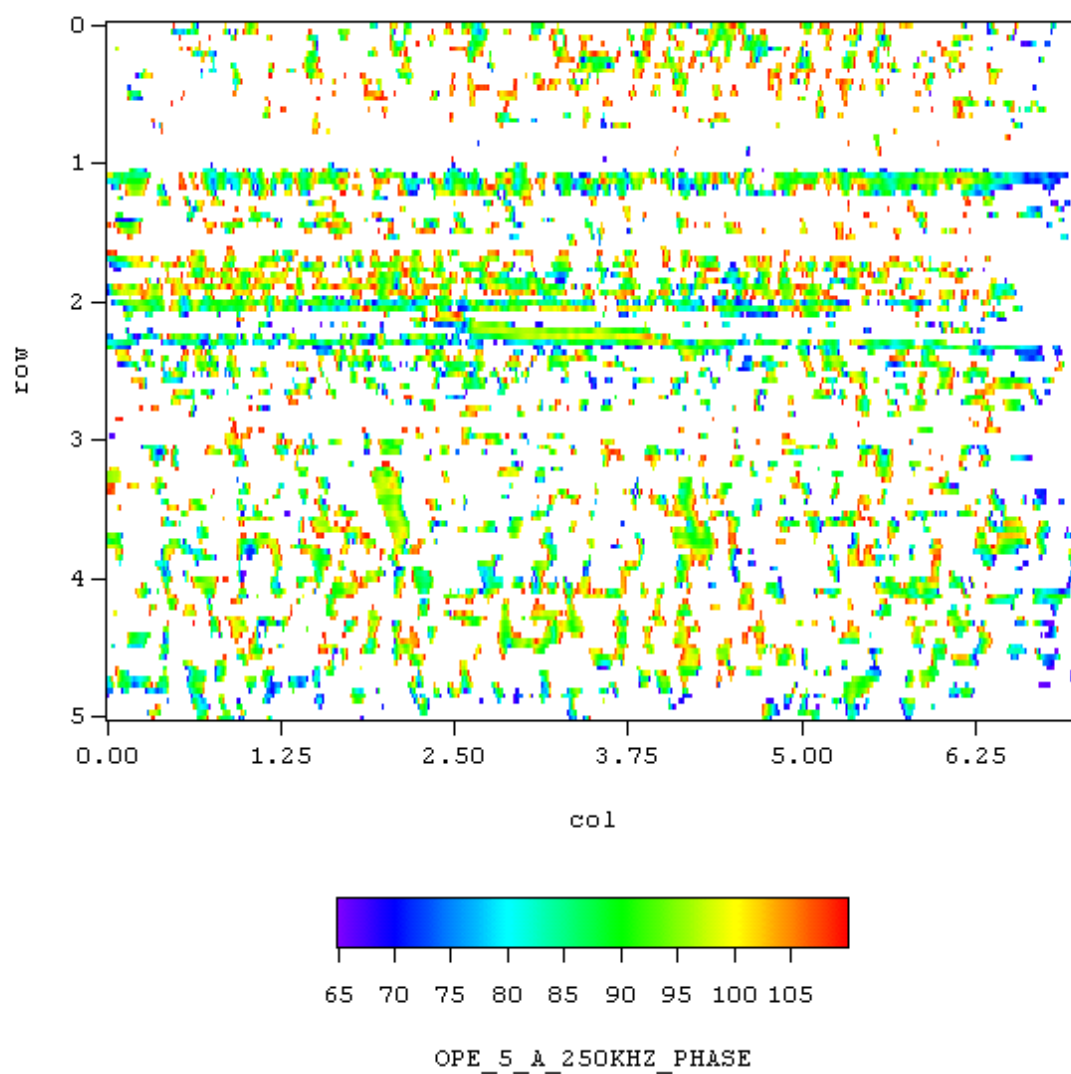
Uzorak OPE-5 sadrži nepravilnost s dugačkom razgranatosti koja zakreće u odnosu na uzdužni smjer. Promjena amplitude signala ([Slika 42]) i fazni pomak ([Slika 44]) pokazuju veći dio nepravilnosti u obodnom smjeru ali samo manje dijelove razgranatosti. Iz podataka o promjeni amplitude signala je vidljivo da je pozadinski šum puno veći u dijelu koji je ljevan centrifugalno nego u dijelu koljena koji je ljevan u mirovanju. Demagnetiziranje je djelomično smanjilo pozadinski šum. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 5,7 mm kraća od stvarne.



Slika 42: Promjena amplitude signala za uzorak OPE-5 [6]

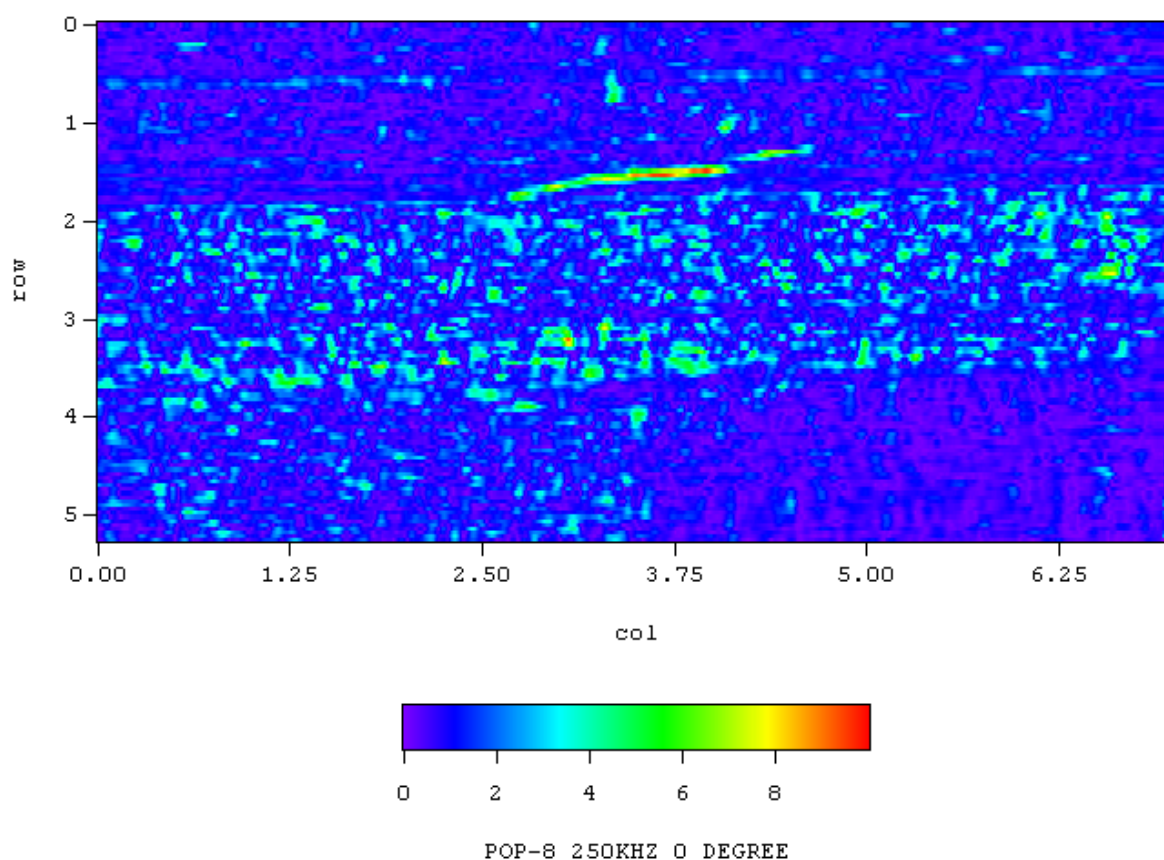


Slika 43: Linijski prikaz za uzorak OPE-5 [6]

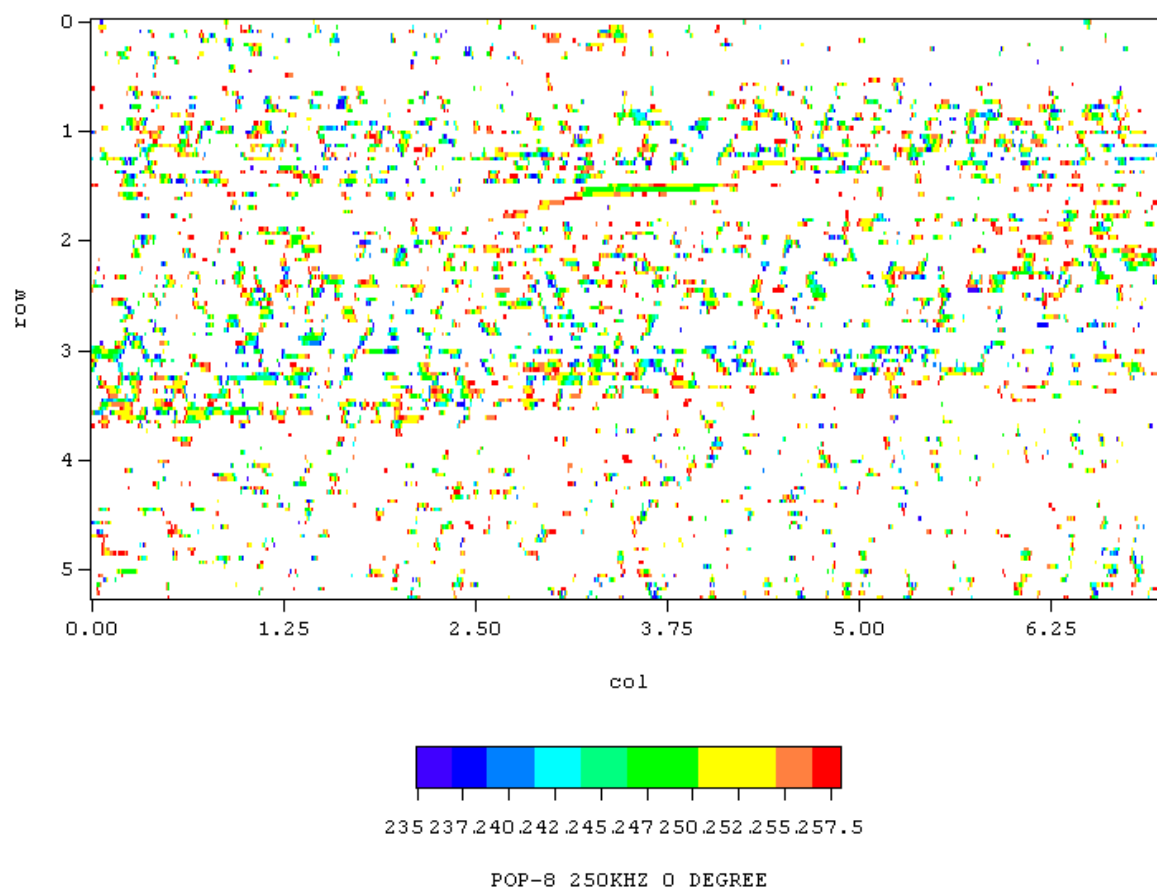


Slika 44: Fazni pomak za uzorak OPE-5 [6]

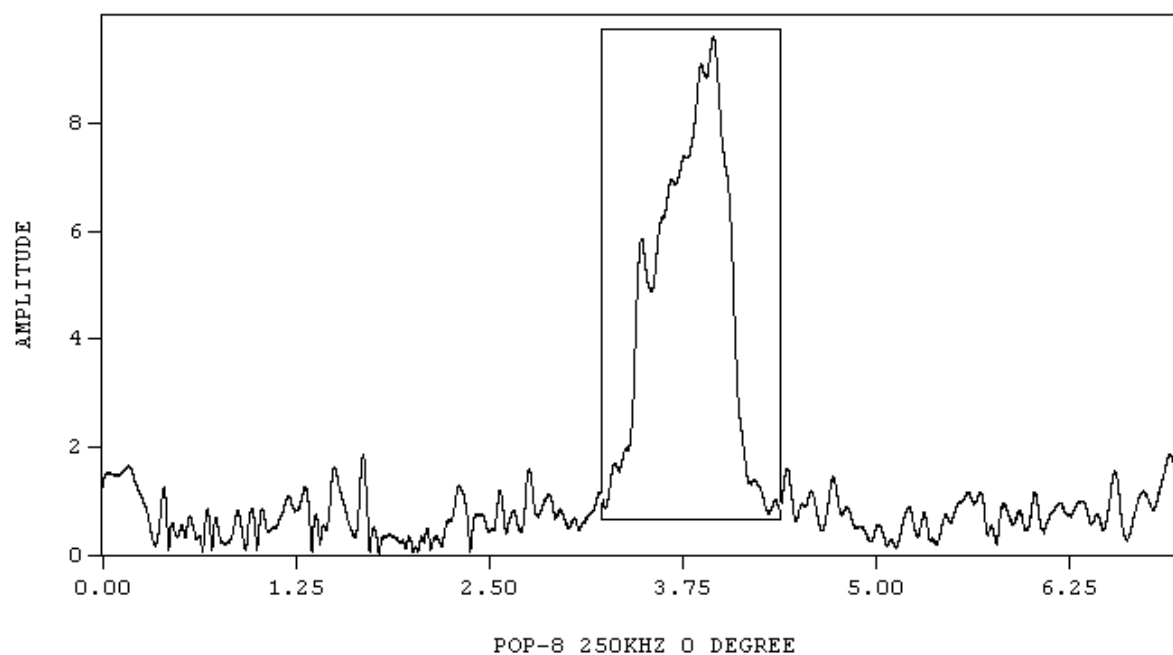
Uzorak POP-8 sadrži nepravilnost s brojnim grananjima u uzdužnom smjeru te dodatnom nepravilnosti s grananjem na krajevima u obodnom smjeru. Nepravilnost je zvjezdastog oblika. Grananja se nalaze s obje strane zavora s time da je najdublji dio nepravilnosti na strani zavora okrenutoj prema koljenu. Manji dijelovi nepravilnosti su bili izrazito teški za uočiti. I praćenje promjene amplitude signala ([Slika 45]) i faznog pomaka ([Slika 46]) su omogućili otkrivanje nepravilnosti te određivanje njenog položaja i dimenzija. Demagnetiziranje uzorka nije imalo učinka na rezultate. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 3 mm veća od stvarne.



Slika 45: Promjena amplitude signala za uzorak POP-8 [6]

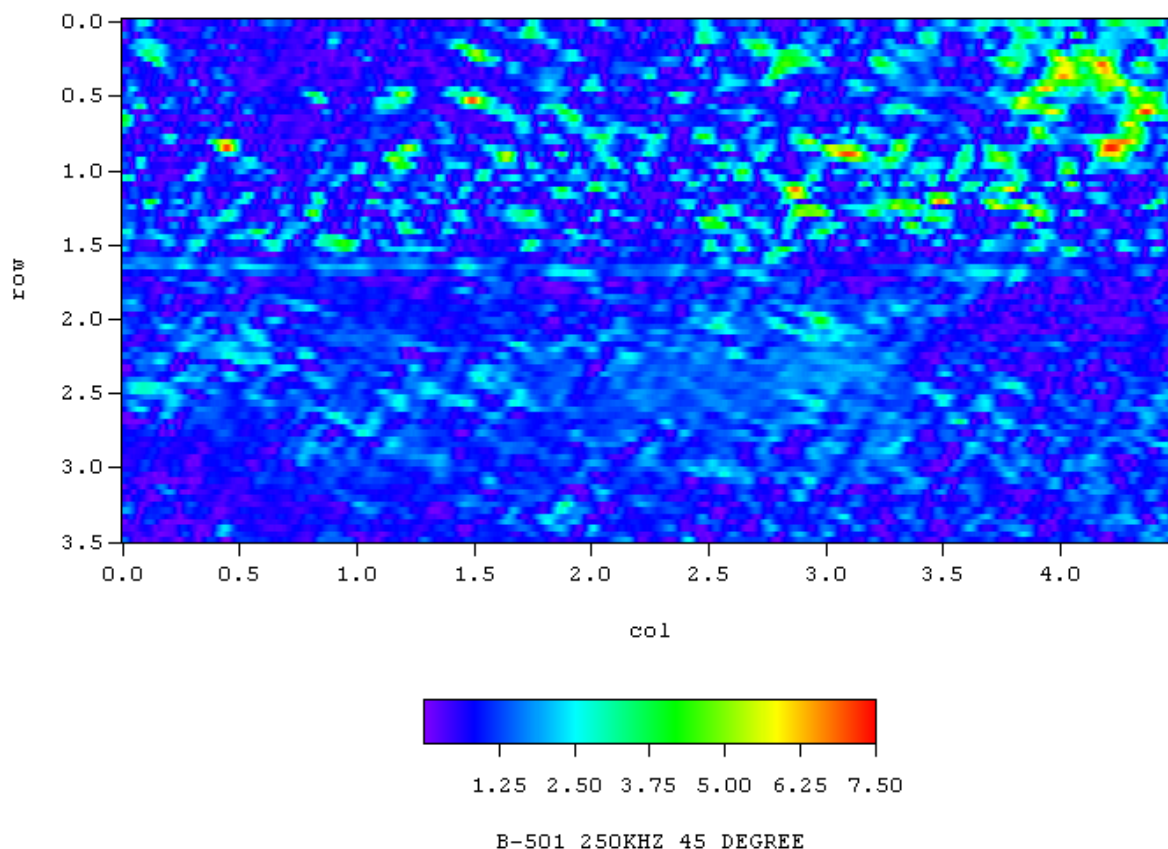


Slika 46: Fazni pomak za uzorak POP-8 [6]

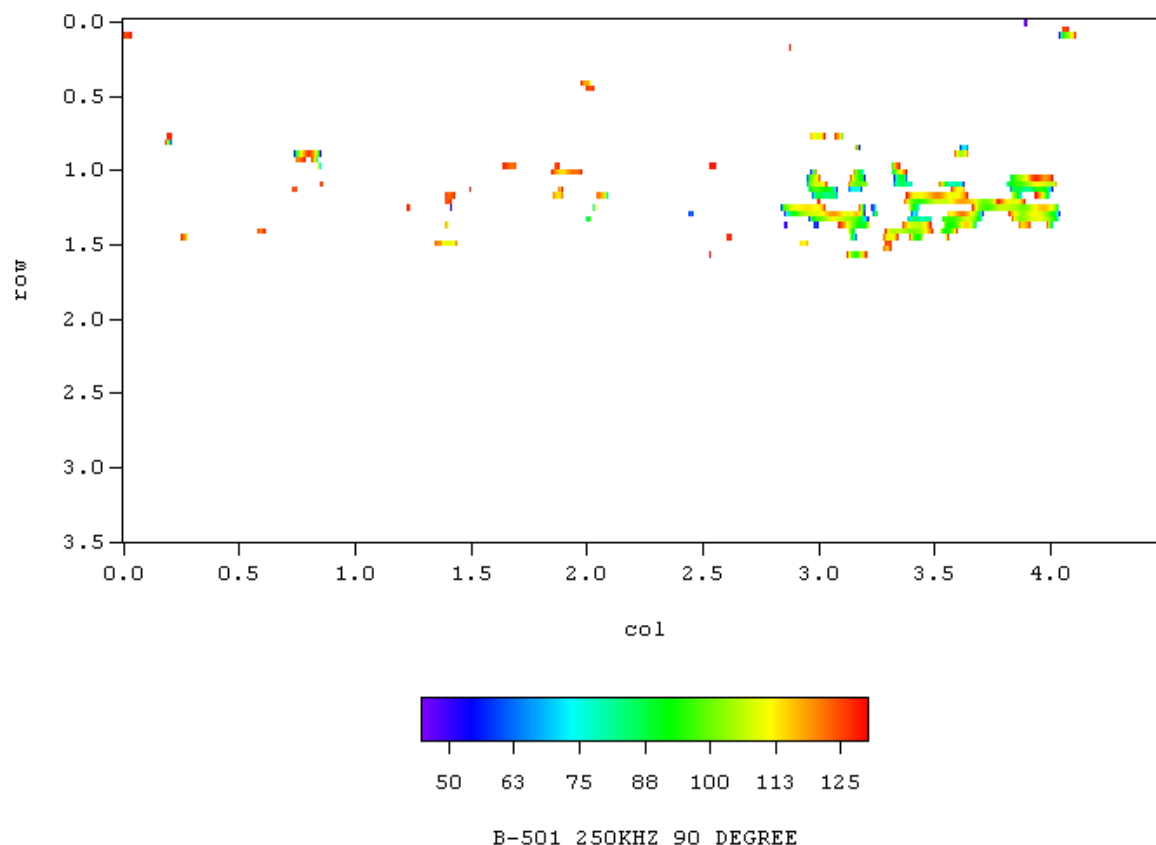


Slika 47: Linijski prikaz za uzorak POP-8 [6]

Uzorak B501 sadrži nepravilnost nastalu uslijed toplinskih opterećenja. Nepravilnost je razgranata i vrtložnog oblika. U početku je nepravilnost bilo teško otkriti ali je to riješeno nagnjanjem sonde pod 45° te je bilo puno lakše otkriti razgranatost. Praćenje i promjene amplitude signala ([Slika 48]) i faznog pomaka ([Slika 49]) je dalo dobre rezultate te je nepravilnost otkrivena i određene su joj lokacija i duljina. Izmjerena duljina je za 0,8 mm kraća od stvarne. S obzirom da je bilo vrlo malo šuma, demagnetiziranje uzorka nije imalo utjecaja na rezultate.

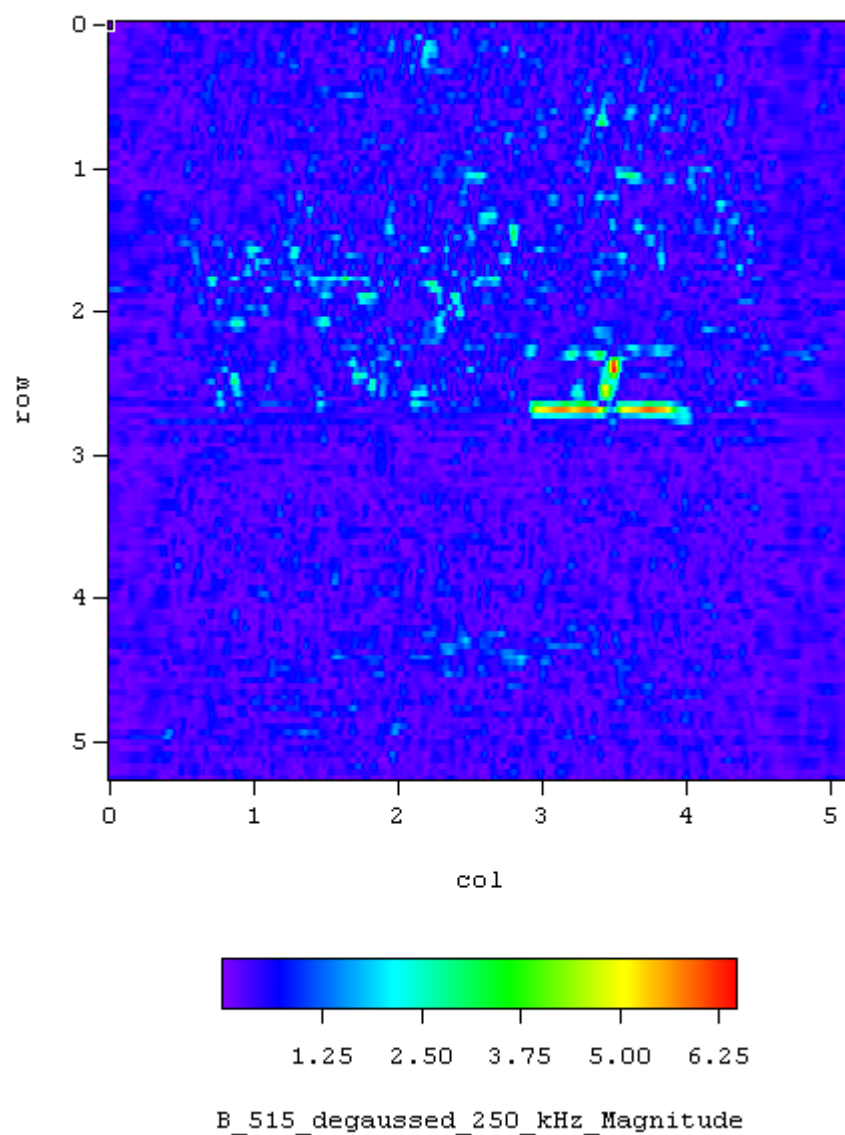


Slika 48: Promjena amplitude signala za uzorak B501 [6]

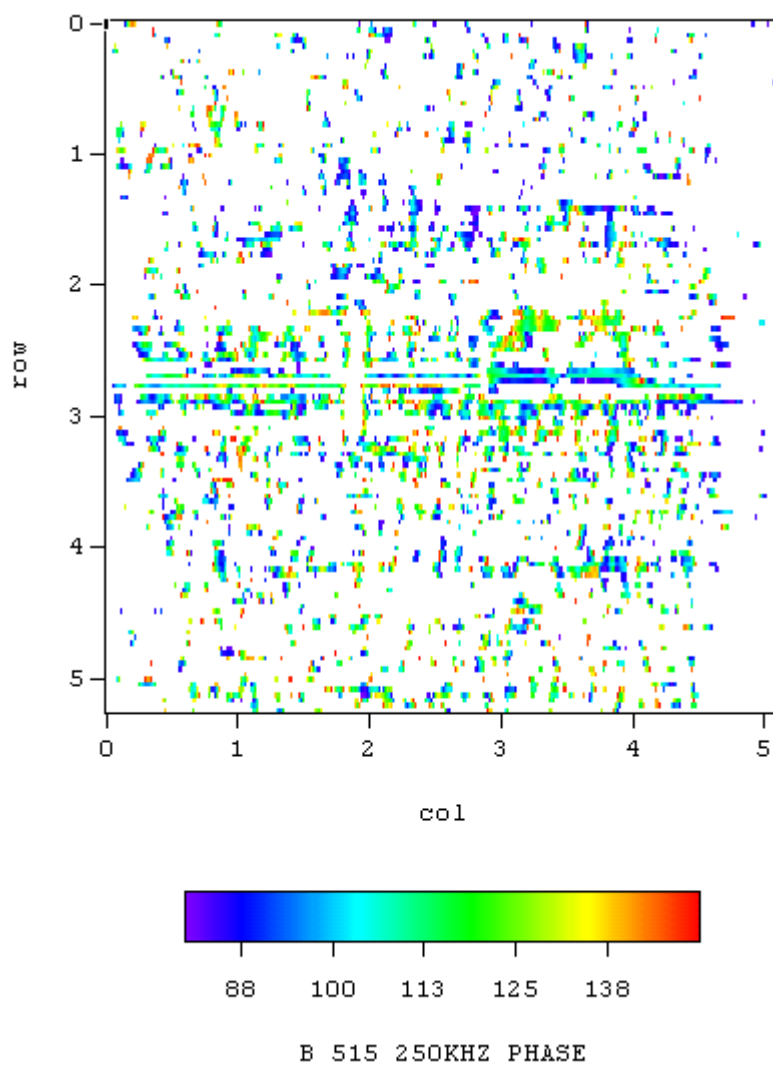


Slika 49: Fazni pomak za uzorak B501 [6]

Uzorak B515 sadrži kratku nepravilnost usmjerenu u obodnom smjeru s grananjem u uzdužnom smjeru tako da zajedno tvore nepravilnost oblika slova T. Praćenje promjene amplitude signala ([Slika 50]) je uspješno pokazalo postojanje nepravilnosti, uključujući grananja, kao i njenu lokaciju i duljinu. Fazni pomak ([Slika 51]) nije dao zadovoljavajuće rezultate. Izmjerena duljina nepravilnosti je za 0,5 mm manja od stvarne. Demagnetizacija uzorka je poboljšala rezultate jer je lagano povećala promjenu amplitude signala te ujedno smanjila pozadinski šum.



Slika 50: Promjena amplitude signala za uzorak B515 [6]



Slika 51: Fazni pomak za uzorak B515 [6]

Grafički prikaz rezultata ispitivanja interpretiramo koristeći se sljedećim smjernicama:

1. kod prikaza amplitude signala - iznos amplitude je prikazan skalom ispod same slike ispitne površine te je svakom iznosu amplitude u voltima pridružena jedna boja; na ordinati je prikazan red prolaza te nam daje položaj nepravilnosti u obodnom smjeru a za dobivanje konkretne vrijednosti u milimetrima je potrebno poznavati korak između redova; na apcisi je prikazan pomak sonde po uzdužnoj osi uzorka u centimetrima
2. kod prikaza faznog pomaka - iznos faznog pomaka je prikazan skalom ispod same slike ispitne površine te je svakom iznosu faznog pomaka u stupnjevima pridružena jedna boja; na ordinati je prikazan red prolaza te nam daje položaj nepravilnosti u obodnom smjeru a za dobivanje konkretne vrijednosti u milimetrima je potrebno poznavati korak između redova; na apcisi je prikazan pomak sonde po uzdužnoj osi uzorka u centimetrima

3. kod linijskog prikaza - na ordinati je prikazan iznos amplitude u voltima; na apcisi je prikazan pomak sonde po uzdužnoj osi uzorka u inčima

Na preostalih sedam uzoraka, koji su bez oštećenja, je provedeno ispitivanje kako bi se utvrdio utjecaj strukture na rezultate mjerenja te su vrijednosti pokazane u [Tablica 7]. S obzirom da su ti utjecaji uključeni i u analizu rezultata uzoraka s oštećenjima, nećemo ih dodatno analizirati.

Specimen ID Descriptor	Did Degaussing Reduce Noise?	False Call (called a crack in a blank specimen)	Average Background Noise Levels (volts)	Peak Magnitude from Anomalous Blips on the Specimens (volts)
EPRI Spool Piece	N/A	No	1.6	6
PNNL B-505	N/A	No	1.1	5.75
AAD #1	N/A	No	1.25	5
AAD #2	N/A	No	1.25	5
AAD #3	N/A	No	1	4.5
Westinghouse Specimen	N/A	No	1.8	6
IHI Southwest Technologies Inc. Specimen	N/A	No	2.75	7.5

Tablica 7: Rezultati ispitivanja na uzorcima bez oštećenja [6]

6. Zaključak

Kao i sve NDT metode, EC nam omogućava ispitivanje uzorka bez da ga oštećujemo. EC metoda se pokazala učinkovitom u otkrivanju različitih relativno malih nepravilnosti na površini ili blizu površine uzorka te pri određivanju oblika i dimenzija nepravilnosti.

Na temelju obrađenog primjera zaključujem da je kod EC metode problem što tokom ispitivanja pozadinski šum, koji je posljedica brojnih faktora kao što je struktura materijala, otežava raspoznavanje nepravilnosti, tj. potrebno je iskustvo kako bi se odredilo što je šum a što nepravilnost. U nekim slučajevima (npr. kod uzorka ONP-3-5) demagnetiziranje uzorka bitno smanjuje šum te omogućava puno jasnije razaznavanje nepravilnosti dok u nekim slučajevima ima vrlo slab ili nikakav utjecaj. Kao što je vidljivo iz analize uzoraka, sam sustav je sposoban raspoznati dimenzijski relativno male promjene u strukturi materijala, što je s jedne strane dobro jer omogućava rano uočavanje mogućih problema tokom eksploatacije (npr. popuštanja nekog zrakoplovnog dijela) te pravovremeno poduzimanje korektivnih radnji ali s druge strane loše jer pokazuje mogućnost postojanja nepravilnosti tamo gdje ih zapravo nema te to može dovesti do krive interpretacije rezultata pa i pouzdanost opada. Na primjerima smo vidjeli i da sposobnost sustava da otkrije nepravilnost ovisi i o prirodi nepravilnosti, npr. kod uzorka B501 uobičajeni položaj sonde nije ukazivao na postojanje nepravilnosti da bi nakon naginjanja sonde za 45° uočili nepravilnost.

S obzirom da navedeni primjeri ne obuhvaćaju zrakoplovne dijelove već dijelove koji su im po nekim karakteristikama slični, važno je naglasiti da je u navedenim primjerima materijal bio nehrđajući čelik dok je dominantni materijal u zrakoplovnoj industriji aluminij. Ovaj podatak je važan jer prema [8] i [9] aluminij ima različitu permeabilnost i električnu vodljivost nego nehrđajući čelik, što znači da je i dubina prodiranja različita za istu ispitnu frekvenciju a time i da je sposobnost ispitnog EC sustava različita u ta dva slučaja.

LITERATURA

- [1] Mihljević, V. : Diplomski rad - Detekcija zavora u metalnim šavnim cijevima , Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [2] EDDY CURRENT TESTING OF AEROSPACE MATERIALS , NASA
- [3] MIL-HDBK-728/2 EDDY CURRENT TESTING, 1985.
- [4] <http://www.olympus-ims.com/en/>
- [5] Rummel, Ward D., Matzkanin, George A.: NONDESTRUCTIVE EVALUATION (NDE) CAPABILITIES DATA BOOK , 1997.
- [6] Diaz, A.A., Mathews, R.A., Hixon1 J., Doctor, S.R. : Assessment of Eddy Current Testing for the Detection of Cracks in Cast Stainless Steel Reactor Piping Components , Pacific Northwest National Laboratory , Richland, 2007.
- [7] <http://www.ndt-ed.org>
- [8] Clarke, Richard A.: Magnetic properties of materials (<http://info.ee.surrey.ac.uk/>)
- [9] Magnetic Properties of Stainless Steels, Carpenter Technology Corporation, 2013.

PRILOZI

I. CD-R disc